引文格式：张春宇,郭际明,王鼎,等. 基于Stacking-InSAR的澜沧江营盘镇—苗尾段滑坡隐患识别[J]. 地理空间信息, 2023, 21(9): 93-97. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.09.023

基于Stacking-InSAR的澜沧江营盘镇—苗尾段滑坡隐患识别

张春宇[1]，郭际明[1*]，王　鼎[1]，许　毅[1]，潘尚毅[2]，乔世雄[2]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430072；2. 中国水利水电第四工程局有限公司，青海 西宁 810007）

摘　要：我国西南部地质灾害频发，江河流域以高山峡谷为主导的复杂地形使得滑坡灾害极易隐藏、突发性高、破坏性强，严重威胁到当地水电站、道路等设施和居民安全，因此快速、准确识别滑坡隐患区域具有重要意义。推导了干涉图堆叠技术（Stacking-InSAR）的计算公式和标准差公式，提取了澜沧江流域营盘镇—苗尾段纵向深切峡谷区域的年均形变速率及其标准差分布，进行了滑坡隐患广域识别，共识别出20处滑坡隐患；并结合光学遥感影像对典型滑坡隐患进行了解译分析。

关键词：滑坡隐患识别；InSAR；Stacking-InSAR；滑坡隐患解译与分析；澜沧江典型滑坡区
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）09-0093-05

Identification of Potential Landslide in Yingpan Town-Miaowei Section of Lancang River by Stacking-InSAR

ZHANG Chunyu[1], GUO Jiming[1], WANG Ding[1], XU Yi[1], PAN Shangyi[2], QIAO Shixiong[2]
(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd., Xining 810007, China)

Abstract: Geological disasters occur frequently in the southwest of China. The complex terrain dominated by high mountains and valleys in river basins makes landslide disasters very easy to hide, sudden and destructive, which can seriously threaten the safety of local hydropower stations, roads and other facilities as well as residents. Therefore, it is of great significance to quickly and accurately identify potential landslide areas. In this paper, we derived the calculation formula and standard deviation formula of Stacking-InSAR, extracted the annual average deformation rate and its standard deviation distribution in the longitudinal deep canyon area of Yingpan Town-Miaowei section of Lancang River basin, and carried out the wide area identification of potential landslide. Finally, we identified a total of 20 potential landslides, and interpreted and analyzed the typical potential landslide in combination with optical remote sensing images.

Key words: potential landslide identification, InSAR, Stacking-InSAR, interpretation and analysis of potential landslide, typical landslide area of Lancang River

澜沧江源出青海玉树杂多县西北冰川，是西南横断山区的重要河流之一，其中游段属于三江流域中段褶大起伏高山峡谷区，河流主要为南北走向，两岸山高谷深，呈收紧之势，形成典型的V形纵向深切峡谷[1]。澜沧江沿岸谷坡高陡、破体结构复杂，坡岸稳定性差，地质灾害易发，加之采矿、削坡建房、道路开挖、修建水电站等频繁的人类工程活动，更易导致流域滑坡、泥石流等地质灾害的发生[1-3]，严重威胁到当地工程设施和人民生命安全。在澜沧江流域沿岸的高山峡谷区开展滑坡灾害隐患早期识别与监测对于防治地质灾害和确保居民生命财产与工程设施安全具有重要意义。

人工排查进行地质灾害普查需投入大量人力，且高山峡谷区交通困难，很多地方人无法到达。基于光学遥感影像的目视解译方法可以发现形变特征明显的滑坡隐患，在大范围滑坡灾害隐患早期识别中具有一定的可行性，但受云雾影响较大且无法获得滑坡形变量，只能做定性解译[4-7]。全站仪、水准仪、全球定位系统等滑坡地表形变监测技术具有较高的精度，但属于已知滑坡体的现场点目标监测，无法实现大范围滑坡隐患形变监测。近年来合成孔径雷达干涉测量技术（InSAR）凭借其高空间覆盖、高监测精度、全天时、全天候等优势受到很多关注，在D-InSAR基础上发展起来的时序InSAR技术

收稿日期：2022-06-15；修回日期：2022-08-01。
项目来源：中国水利水电第四工程局有限公司科技资助项目（KJ-2018-019）。
第一作者简介：张春宇（1997—），硕士，研究方向为InSAR数据处理与应用，E-mail：1103209538@qq.com。
通信作者：郭际明（1965—），教授，主要研究方向为大地测量学与测量工程，E-mail：jmguo@sgg.whu.edu.cn。

已被成功应用于城市沉降、矿山形变、地震形变、火山活动、基础设施形变、冰山运动和滑坡灾害等形变监测中[8]。时序InSAR在滑坡灾害隐患早期识别与监测研究中的应用也有很多，其中干涉图堆叠方法（Stacking-InSAR）和小基线集时间序列方法（SBAS-InSAR）较常用，Dai K R[9]等基于X波段的TerraSAR-X数据，利用Stacking-InSAR监测了国道G214共和—玉树冻土区公路的稳定性；刘斌[10]等联合ScanSAR与TOPS数据，利用Stacking-InSAR实现了大规模滑坡地质灾害识别；张成龙[11]等利用GACOS数据辅助Stacking-InSAR探测了金沙江流域西藏贡觉县雄松乡至沙东乡的滑坡隐患，并对比LiCSBAS[12]结果以验证可行性；陆超然[13]等结合D-InSAR与SBAS-InSAR对贵州黔东南州进行大范围地灾隐患点探测；代聪[14]等基于升降轨Sentinel-1A数据，利用SBAS-InSAR成功探测出舟曲县城上下游区域23处活动滑坡；李梦华[15]等利用StaMPS/MT-InSAR成功探测出茂县岷江河谷沟口乡至石大关乡段的20余处滑坡隐患；戴可人[16]等利用SBAS-InSAR对雅砻江流域雅江县至木里县段高山峡谷区域进行了滑坡灾害隐患广域早期识别，识别出8处滑坡隐患。PS-InSAR和SBAS-InSAR等时间序列方法具有较高的监测精度，但计算效率低、受相干性影响较大，在相干性较低的山区观测点较少，且难以探测到大的形变，更适用于局部小范围的精细化形变监测；而Stacking-InSAR计算效率高、受相干性影响较小，更适用于大范围形变探测，是一种快速、有效、定性识别广大山区滑坡隐患的有效方法[17]。

目前澜沧江流域大范围滑坡隐患识别的研究较匮乏，本文在推导Stacking-InSAR的平均形变速率及其标准差公式的基础上，利用103景升轨Sentinel-1数据得到澜沧江流域营盘镇—苗尾段年均形变速率及其标准差分布，开展滑坡灾害隐患识别研究，并结合光学遥感影像对典型滑坡隐患进行解译分析，为当地防灾减灾工作提供数据与技术支持，为相似区域滑坡灾害隐患识别提供思路与方案。

1 Stacking-InSAR原理

Stacking-InSAR最早由Sandwell于1998年提出[18]。假设相位噪声（包括大气相位）在时间上为随机噪声，地表形变接近线性形变且每个干涉对的权重取决于其干涉的时间间隔，即 $P_i=\Delta t_i^2$，则相位变化速率的加权平均值可表示为：

$$\bar{\varphi}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\varphi_i}{\Delta t_i}P_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}P_i}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\varphi_i\Delta t_i\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i^2} \tag{1}$$

式中，φ_i、Δt_i分别为第i幅差分干涉图解缠后的相位和时间间隔；n为参与计算的干涉图数量。

$$\bar{d}=\frac{\lambda\times\bar{\varphi}}{4\pi} \tag{2}$$

式中，$\bar{d}$为雷达视线方向的平均形变速率；λ为雷达波长。

以$\bar{d}$为参考值，第i张差分干涉图的残差为：

$$V_i=\bar{d}\Delta t_i-d_i \tag{3}$$

其中，d_i表示第i张差分干涉图得到的形变，因此单次差分干涉测量代表性标准差和平均形变速率标准差分别为：

$$\sigma(d)=\sqrt{\frac{n}{n-1}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta t_i^2\left(\frac{\lambda}{4\pi}\frac{\varphi_i}{\Delta t_i}-\bar{d}\right)^2\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i^2}} \tag{4}$$

$$\sigma(\bar{d})=\sqrt{\frac{1}{n-1}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta t_i^2\left(\frac{\lambda}{4\pi}\frac{\varphi_i}{\Delta t_i}-\bar{d}\right)^2\right)}{\sum_{i=1}^{n}\Delta t_i^2}} \tag{5}$$

由此可知，Stacking的加权平均处理相对于单次差分干涉测量，形变速率的标准差显著减小，为单次差分干涉测量的$1/\sqrt{n}$倍。

2 研究区概况与数据来源

澜沧江主要流经青海、西藏和云南3省，流域主体位于21°30′~32°40′N、93°~101°50′E，是西南横断山区的重要河流之一。本文选取澜沧江大华—苗尾段作为研究区，位于澜沧江中游段，云南省临沧市、怒江州与大理白族自治州境内，维西—云龙之间，第一梯度带向第二梯度带过渡区域；地处温泉—澜沧江结合带，西侧邻近怒江结合带，东侧靠近哀牢山—红河断裂带，岩层以坚硬岩浆岩、坚硬变质岩和坚硬碎屑岩为主；属于三江流域中段断褶大起伏高山峡谷区，区域内河道顺直、河谷狭窄，西岸主要为滇西纵谷侵蚀中山地貌，东岸主要为碧罗雪山中山山地地貌，呈基本对称V形，为典型的纵向深切峡谷[1,3]；区内澜沧江两岸大部分边坡高差较大，高处的松散物质具有巨大势能，临近多处断裂带，地震活动频繁，加之水电站库区蓄水等人类活动和降雨等气候影响，滑坡、崩

塌、泥石流等地质灾害频发[2]。

本文采用103景升轨Sentinel-1数据（Path99，Frame1265），时间跨度为2017-08-09—2020-12-27；利用欧空局提供的精密轨道数据纠正由轨道误差引起的相位误差，利用SRTM 30 m空间分辨率的DEM去除地形相位。

3　数据处理与结果分析

3.1　数据处理

本文采用GAMMA软件进行Stacking-InSAR的数据处理，具体流程见图1。

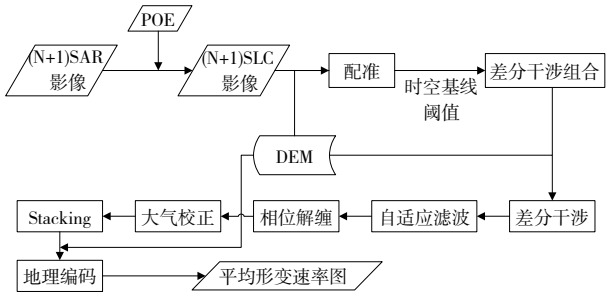


图1　Stacking-InSAR数据处理流程图

设置时间基线阈值为48 d，空间基线阈值为150 m，对103景升轨Sentinel-1数据进行干涉组合，共形成393组差分干涉对；采用上述处理流程，最终得到澜沧江营盘镇—苗尾段沿岸坡体雷达视线方向的年均形变速率（图2），其中红色代表地面远离卫星方向的形变，蓝色代表地面靠近卫星方向的形变。

3.2　Stacking-InSAR整体识别结果

识别滑坡隐患时不仅需考虑形变信息，还需从DEM或光学影像上判断坡体是否具有滑坡形态。本文共识别出20处滑坡隐患（图2a），并放大展示了3个隐患密集区（图2b~2d），整体来看，隐患主要集中在澜沧江营盘镇—大华村段西岸以及苗尾电站上游西岸，这些隐患中有部分存在巨大威胁。Stacking计算的标准差分布见图3，年均形变速率标准差不超过12.3 mm/a，说明标准差易受相干性影响，在研究区北部营盘镇附近地表植被覆盖稀薄、地形起伏较小，相干性较高，标准差较小；南部部分区域地形起伏较大，受几何畸变[16]和较厚植被覆盖影响，相干性较差，标准差较大。

在ArcGIS中依据滑坡隐患边界统计所有隐患区域的面积、最大形变速率、平均形变速率、威胁对象、形变速率标准差等指标；再利用SRTM DEM计算隐患区域的平均坡度。根据隐患形变特征、光学影像特征等，定性评估风险等级：①仅有较大形变（最大形变速率>40 mm/a）的隐患为低风险隐患；②有较大形变且具备一定规模（面积>5×10^4 m^2）的隐患为中风险隐患；③有较大形变、具备一定规模且有直接威胁对象（居民点，公路、桥梁、水电站等工程设施）的隐患为高风险隐患。20处滑坡隐患中有5处低风险隐患、6处中风险隐患、9处高风险隐患，高风险隐患需重点关注；同时图2c下方发现苗尾电站坝体存在形变，后续应对该处展开监测性研究。

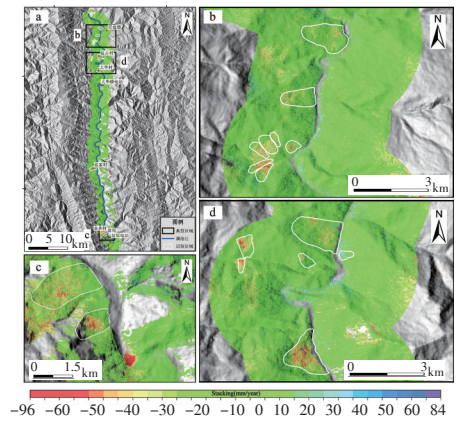


图2　研究区的Stacking-InSAR形变速率图

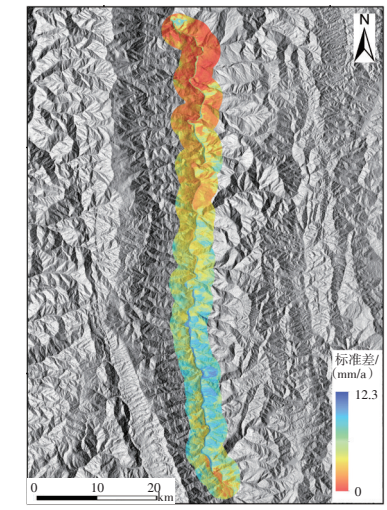


图3　标准差分布图

3.3　典型隐患解译与分析

9处高风险隐患中5处位于营盘镇—大华村段，1处位于研究区中段怒萝苇傍，3处位于张家村—苗尾段，本文将结合光学遥感影像对高风险隐患进行解译分析。隐患1（图4a、4d）位于拉古村，坡向东偏南，面积约为166×10^4 m^2，呈梨形，平均坡度超过22°，最大形变速率达79 mm/a；坡面主要为裸地和薄植被覆盖，且有多处冲沟裂缝（黑色箭头所示），坡体很不稳定，威胁到拉古村，伴有堵江风险。隐患2（图4b、4e）位于大华村，坡向东偏北，面积约为134×10^4 m^2，呈簸箕形，平均坡度超过24°，最大形变速率达89 mm/a；坡面主要为薄植被覆盖，后缘可见

由拉伸造成的植被稀疏；红色虚线范围内已发生过明显的局部崩滑，是坡体不稳定的直接表现，威胁到大华村，伴有堵江风险。隐患6（图4c、4f）位于刺果马达南部，坡向为正西，面积约为13×10^4 m^2，呈梨形，平均坡度超过24°，最大形变速率达53 mm/a；坡体植被覆盖稀疏、侧壁明显，威胁到坡体上的分散居民、省道S237。隐患12（图5a、5d）位于格甲登东部，坡向东南，面积约为17×10^4 m^2，呈簸箕形，平均坡度超过25°，最大形变速率达64 mm/a；坡体植被稀少，临江处有小型碎屑流（黑色箭头所示），冲刷痕迹明显，是坡体不稳定的表现，威胁到坡体上的分散居民，且伴有堵江的风险。隐患14（图5b、5e）位于恩棋村，坡向东偏南，面积约为127×10^4 m^2，呈舌形，平均坡度超过19°，应为一处古滑坡，最大形变速率达63 mm/a；坡体上自然植被较少，临江处存在局部崩塌（黑色箭头所示），古滑坡有复活迹象，威胁到梭鲁寨与桥梁，伴有堵江风险。隐患15（图5c、5f）位于兔峨乡东对岸、怒萝苇傍南，坡向西偏南，面积约为6×10^4 m^2，呈梨形，平均坡度超过31°，最大形变速率达48 mm/a；坡体主要为裸地，红色虚线范围内存在较大的局部碎屑流，滑动痕迹明显，威胁到坡体上的分散居民。隐患18（图6a、6d）位于苗尾，坡向东偏北，面积约为60×10^4 m^2，呈舌形，平均坡度超过

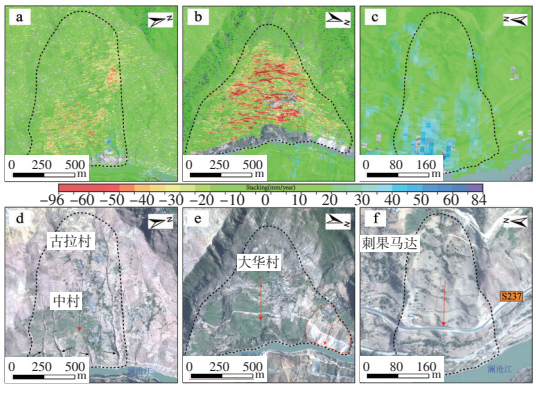


图4 隐患1、2、6的形变速率和光学遥感影像

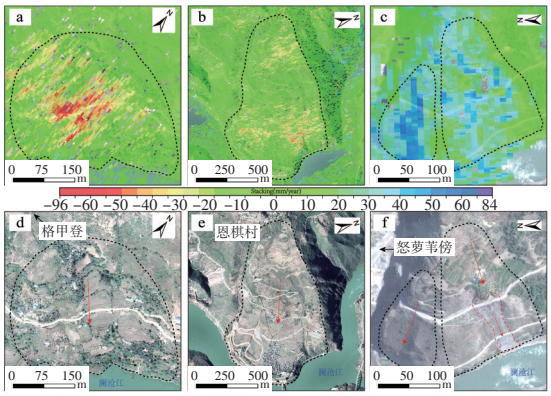


图5 隐患12、14、15的形变速率和光学遥感影像

25°，最大形变速率达87 mm/a；农田开垦、土料开挖使得植被覆盖度低，坡体不稳定，直接威胁水井村，伴有堵江的风险，间接威胁到下游紧挨的苗尾水电站。隐患19（图6b、6e）位于水井村，坡向东偏北，面积约为157×10^4 m^2，呈舌形，平均坡度超过18°，最大形变速率达67 mm/a；坡体多为薄植被覆盖，有多处较宽的冲沟裂缝（如黑色箭头所示），坡体不稳定，直接威胁水井村，伴有堵江的风险，间接威胁到下游邻近的苗尾水电站。隐患20（图6b、6e）位于张家村，坡向东偏北，面积约为198×10^4 m^2，呈舌形，平均坡度超过17°，最大形变速率达86 mm/a；坡体呈阶梯状分层，前陡后缓，缓坡薄植被覆盖，陡坡为裸地，坡面上有多处宽冲沟裂缝（黑色箭头所示），形变聚集区（红色虚线范围）有明显的局部滑移迹象，陡缓坡交界处形成多层错台，坡体很不稳定，直接威胁到张家村且伴有堵江的风险。

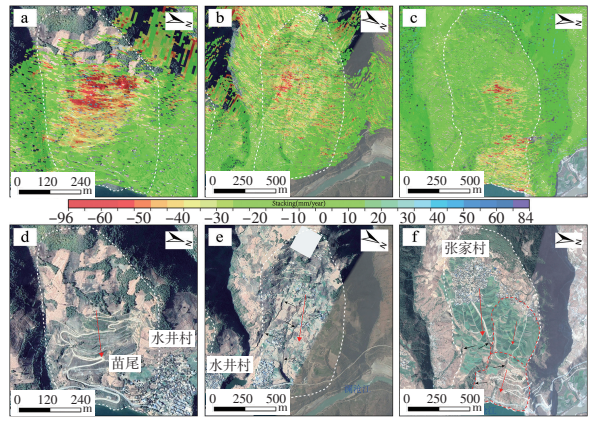


图6 隐患18、19、20的形变速率和光学遥感影像

4 结 语

本文推导了Stacking-InSAR的平均形变速率及其标准差公式，并基于103景Sentinel-1数据计算了2017年8月—2020年12月澜沧江营盘镇—苗尾段两岸坡体的年均形变速率及其标准差，进而进行研究区滑坡隐患识别，成功识别20处滑坡隐患。根据多个指标定性评价了隐患的风险等级，并结合光学遥感影像对9个高风险隐患进行解译分析，结果表明这些隐患的光学影像均具有明显的形变特征，且都较大程度地威胁到居民点或水电站、公路、桥梁等工程设施和澜沧江，验证了Stacking-InSAR用于滑坡隐患识别的有效性。

参考文献

[1] 王欣. 澜沧江中游深切峡谷区工程地质特征及分区评价[D]. 成都:成都理工大学,2020

[2] 闫满存,王光谦. 基于GIS的澜沧江下游区滑坡灾害危险性

分析[J]. 地理科学,2007,27(3):365-370
[3] 明庆忠. 纵向岭谷北部三江并流区河谷地貌发育及其环境效应研究[D]. 兰州:兰州大学,2006
[4] 陆会燕,李为乐,许强,等. 光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1 342-1 354
[5] 赵超英,刘晓杰,张勤,等. 甘肃黑方台黄土滑坡InSAR识别、监测与失稳模式研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):996-1 007
[6] Dong J,Liao M S,Xu Q,et al. Detection and Displacement Characterization of Landslides Using Multi-temporal Satellite SAR Interferometry: A Case Study of Danba County in the Dadu River Basin[J]. Engineering Geology,2018,240:95-109
[7] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949-956
[8] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 717-1 733
[9] Dai K R,Liu G X,Li Z H,et al. Monitoring Highway Stability in Permafrost Regions with X-band Temporary Scatterers Stacking InSAR[J]. Sensors,2018,18(6):1 876
[10] 刘斌,葛大庆,王珊珊,等. TOPS和ScanSAR模式InSAR在广域地灾隐患识别中的联合应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1 756-1 762
[11] 张成龙,李振洪,余琛,等. 利用GACOS辅助下InSAR Stacking对金沙江流域进行滑坡监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(11):1 649-1 657
[12] Morishita Y,Lazecky M,Wright T J,et al. LiCSBAS: An Open-source InSAR Time Series Analysis Package Integrated with the LiCSAR Automated Sentinel-1 InSAR Processor[J]. Remote Sensing,2020,12(3):424
[13] 陆超然,蔡杰华,刘东烈,等. 基于卫星InSAR技术的地质灾害隐患点探测与形变分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(2):216-222
[14] 代聪,李为乐,陆会燕,等. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡InSAR探测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(7):994-1 002
[15] 李梦华,张路,董杰,等. 四川茂县岷江河谷区段滑坡隐患雷达遥感识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 529-1 537
[16] 戴可人,铁永波,许强,等. 高山峡谷区滑坡灾害隐患InSAR早期识别:以雅砻江中段为例[J]. 雷达学报,2020,9(3):554-568
[17] Zhang L L,Dai K R,Deng J,et al. Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and Its Performance Comparison with SBAS-InSAR[J]. Remote Sensing,2021,13(18):3 662
[18] Sandwell D T,Price E J. Phase Gradient Approach to Stacking Interferograms[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth,1998,103(B12):30 183-30 204

（上接第88页）

结合的重点难点内容，在市级总规成果上报审查过程中，需要就更多细节问题做进一步完善。

参考文献

[1] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《省级国土空间规划编制指南(试行)》的通知[Z].
[2] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《市级国土空间总体规划编制指南(试行)》的通知[Z].
[3] 自然资源部. 自然资源部办公厅关于印发《市级国土空间总体规划制图规范(试行)》和《市级国土空间总体规划数据库规范(试行)》的通知[Z].
[4] 国土资源部. 土地利用总体规划编制审查办法(2009):中华人民共和国国土资源部令第43号[S].
[5] 市(地)级土地利用总体规划数据库标准:TD/T 1026-2010[S].
[6] 县级土地利用总体规划数据库标准:TD/T 1027-2010[S].
[7] 乡(镇)土地利用总体规划数据库标准:TD/T 1028-2010[S].
[8] 建设部. 城市规划编制办法(2005):中华人民共和国建设部令第146号[S].
[9] 中共中央,国务院. 中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见[Z].
[10] 何宗,刘建. 基于GIS的重庆市镇街乡规划综合数据库建设[J]. 地理空间信息,2015,13(2):22-24
[11] 林常春,周彩琴,贺文龙,等. 国土空间规划数据库建设研究:以规划方案在数据库中的表达及图数一致性为例[J]. 农业工程,2022,12(2):83-86
[12] 王慧,陈慧媛,熊娟. 国土空间总体规划数据库建库与质检问题研究[J]. 房地产世界,2021(18):58-60
[13] 李满春,陈振杰,周琛,等. 面向"一张图"的国土空间规划数据库研究[J]. 中国土地科学,2020,34(5):69-75
[14] Liu Y S,Li Y H. Revitalize the World's Countryside[J]. Nature,2017,548(7 667):275