基于时序 InSAR 技术的木鱼包滑坡时空变形特征分析

刘艺梁[a,b,c]，樊西丰[a,b,c*]，申高伟[a,b,c]，左清军[a,b,c]，唐玄[a,b,c]，李永奕[a,b,c]，朱前[a,b,c]

三峡大学 a. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室；b. 防灾减灾湖北省重点实验室；c. 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002

第一作者，E-mail：lyl@ctgu.edu.cn

* 通信作者，E-mail：1518226868@qq.com

2024-08-28 收稿；2024-10-10 修回；2024-10-21 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(41807294)；湖北省自然科学基金项目(2018CFB400)

中图分类号：P237; P642.22　　文章编号：2096-8523(2025)02-0078-16　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240489

摘　要：自 2003 年三峡库区蓄水以来，木鱼包滑坡持续变形，严重威胁长江航运和库区人民生命财产安全。为全面精准地分析滑坡地表变形信息，采用斯坦福永久散射体−多时相 InSAR(StaMPS-MTI)技术和短基线集时序 InSAR(SBAS-InSAR)技术结合哨兵一号数据反演木鱼包滑坡 2017−2022 年的地表形变，并与全球导航卫星系统(GNSS)监测数据进行对比分析，结合 2 种技术的优点，点面结合对滑坡的时空变形特征进行了分区研究。研究结果表明：InSAR 技术得到的形变信息可靠，2 种时序 InSAR 技术各有优劣；对比各个分区的形变速率区间值，滑坡东侧坡面(−30.6 ~ −46.2 mm/a)>主滑面东侧(−25.2 ~ −37.8 mm/a)>主滑面西侧(−21.5 ~ −31.5 mm/a)。在 InSAR 形变结果和前人研究基础上，对木鱼包滑坡变形模式进行了总结：木鱼包滑坡变形受降雨和库水影响，分为整体变形和局部变形 2 种。在高水位运行期，滑坡受浮托减重作用发生整体变形，库水阈值约为 168 m。强降雨入渗岩体使地下水位升高，促使整体变形的同时，影响浅层土体和破碎岩体导致局部变形。在库水位下降期，滑坡受浮托减重和动水压力共同影响，其中浮托减重作用占主导地位，动水压力存在约 36 d 的滞后时间。在低水位运行期和库水位上升期，整体变形停止，强降雨使局部变形区发生变形。研究结果证明时序 InSAR 技术可以有效识别和监测滑坡，可以为地质灾害防治、风险评价提供技术支撑。

关键词：木鱼包滑坡；形变监测；SBAS-InSAR；StaMPS-MTI；三峡库区；库水位；降雨

滑坡是我国最严重的地质灾害之一。据不完全统计，近 20 a 我国境内发生滑坡灾害 28 万处以上，曾多次造成千人以上的伤亡[1-2]。三峡库区作为我国地质灾害多发区，库岸边坡常年受库水波动影响。目前在三峡库区已探明的大型滑坡、崩塌体有 1 000 处以上[3]，且大型滑坡不同位置变形特征存在明显的差异性[4]。木鱼包滑坡作为其中之一，自 2003 年三峡库区蓄水以来，一直持续变形，已对长江航运和库区人民生命财产安全构成了巨大的威胁。目前对木鱼包滑坡的专业监测以点状接触式形变监测技术为主，精度较高，但无法从区域面状的角度反映滑坡的整体变形情况[5]。

合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar，简称 InSAR)起源于 20 世纪 70 年代。经过这些年的发展，凭借其全天候(不受云层、降雨的影响)、大范围(最大可达 10 万 km^2)、高分辨率(10 m 级)、高精度(mm 级)的优点，常在滑坡、地震、火山、地面沉降等地质灾害中用来提取地表形变[6-7]。InSAR 技术目前已成为滑坡监测、研究领域最有效的技术手段之一[8-9]。

时间序列 InSAR 技术，由 D-InSAR(differential InSAR)[10] 技术演变而来，利用多时相 SAR 数据，结合大气校正、相位解缠等技术，可以反演出高精度带有时间序列信息的地表形变数据。目前常见的时间

著录信息：刘艺梁，樊西丰，申高伟，等. 基于时序 InSAR 技术的木鱼包滑坡时空变形特征分析[J]. 地质科技通报，2025，44(2)：78-93.
LIU Yiliang，FAN Xifeng，SHEN Gaowei，et al. Analysis of spatio-temporal deformation characteristics of the Muyubao landslide via time series InSAR technology[J]. Bulletin of Geological Science and Technology，2025，44(2)：78-93.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjqb.cug.edu.cn

序列 InSAR 技术主要包括 PS-InSAR(Persistent Scatterer InSAR)[11-12]、DS-InSAR(Distributed Scatterer InSAR)、StaMPS-MTI(Stanford method for persistent scat-terers-ulti-temporal InSAR)等利用高质量像素点减少误差的点状时序 InSAR 和 Stacking-InSAR、SBAS-InSAR(Small Baseline Subsets InSAR)等采用特殊配对方式优化干涉信号的面状时序 InSAR。

国内外已有许多学者使用时序 InSAR 技术对滑坡进行了研究。基于点状 InSAR：张亚迪等[13] 使用 StaMPS-MTI 技术对芒康地区进行了滑坡早期识别；ZHOU 等[14] 使用 StaMPS-MTI 技术研究了木鱼包滑坡的演化机制；朱同同等[15] 使用 StaMPS-MTI 技术对三峡库区树坪滑坡的稳定性进行了分析；ZHANG 等[16] 结合 PS-InSAR 技术和数值模拟对雅鲁藏布江下游冰川相关地质灾害链进行了分析；ZHANG 等[17] 结合 StaMPS-MTI 技术与 Hurst 指数对万州库岸滑坡进行了监测分析。点状 InSAR 获取的形变结果精度高、抗噪能力强，但受限于高质量散射体的数量，在部分情况下无法全面反映研究对象的信息。基于面状 InSAR：范景辉等[18] 基于 SBAS-InSAR 技术对范家坪滑坡进行了变形监测与分析，确定了 InSAR 技术在木鱼包滑坡变形监测上的可行性；赵超英等[19] 使用多源 SBAS-InSAR 技术对黑方台地区的滑坡进行了形变监测和失稳模式研究；朱智富等[20] 结合 SBAS-InSAR 技术和信息熵技术对苍山区域进行了滑坡早期识别；TSIRONI 等[21] 使用改进 SBAS-InSAR 技术研究了亚该亚地区活动滑坡的运动学行为；赵蓓蓓等[22] 使用 SBAS-InSAR 技术对木鱼包滑坡的时空变化特征进行了具体分析；包馨等[23] 运用改进 SBAS-InSAR 技术联合哨兵一号升降轨数据对金沙江流域进行了滑坡早期识别；杨沛璋等[24] 使用 SBAS-InSAR 技术对梯子槽倾倒体变形特征进行了分区研究；刘涛等[25] 结合 SBAS-InSAR 获取形变信息和数值模拟对顶崖古滑坡稳定性进行了评价分析。面状 InSAR 不受限于特定散射体，信息量较多，但相较于点状 InSAR 在部分区域其精度相对较低。

由于单一技术方法不可避免地存在一定的缺陷，目前诸多学者使用多种时序 InSAR 技术点面结合进行对比分析：张凯翔等[26] 使用 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 技术获取了研究区域地面沉降信息；YAO 等[27] 以西藏贡觉县为研究对象对比分析了 SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 在区域滑坡监测方面的优劣性，并得出结论：2 种方法得到的变形结果相近但 SBAS-InSAR 信号覆盖更为全面；ZHANG 等[28] 对比了 StaMPS-PS、StaMPS-SBAS、StaMPS-MTI 3 种技术的空间采样率和数据准确度，证明了 StaMPS-MTI 技术在数据准确度方面的优越性。

综上所述，各种时序 InSAR 技术各有优劣。不少学者使用 InSAR 技术在木鱼包滑坡的时空变形特征和变形机理方面取得了一定的成果，但前人针对木鱼包滑坡的研究大多使用单一技术方法，并未充分发挥不同时序 InSAR 技术在滑坡形变监测不同领域的优势，同时也并未对木鱼包滑坡不同位置变形机理进行分区讨论。

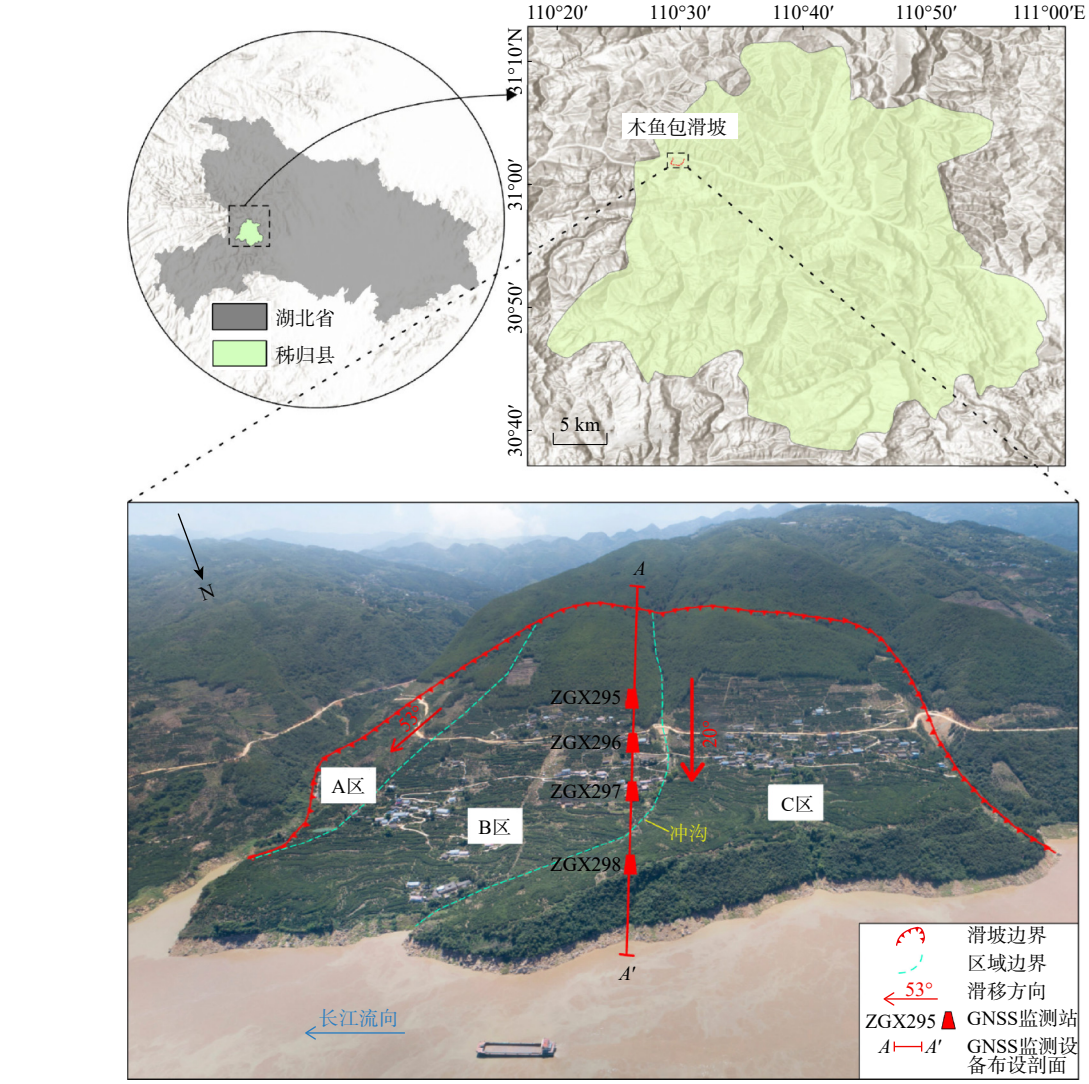
基于上述背景，本研究使用信号覆盖最为全面的 SBAS-InSAR 和数据准确度最高的 StaMPS-MTI 技术，利用哨兵一号(Sentinel-1A)卫星升轨数据对木鱼包滑坡进行地表形变提取。将实验结果与 GNSS 数据进行对比，以验证时序 InSAR 技术在滑坡形变提取方面的可靠性，同时结合 2 种技术的优势对木鱼包滑坡的空间、时间变化特征进行分区研究。

1 滑坡概况与数据源

木鱼包滑坡位于湖北省秭归县沙镇溪镇范家坪村的长江南岸，长度约 1 500 m，宽度约 1 400 m，平面形态整体呈马蹄形，滑坡走向近 EW 向，东部以大乐沟为界，西部以鹅软石沟为界(图 1)。滑坡由东西两侧坡面组成，东侧坡面长约 900 m，宽约 300 m，倾向约 53°。坡体上缓下陡，倾角在 15° ~ 23°之间。西侧坡面为滑坡主滑面，长约 1 500 m，宽约 1 200 m，主滑方向约 20°，平均坡度为 20°，总体趋势上陡下缓，坡面中部发育有从坡顶至前缘的冲沟。木鱼包滑坡存在明显的分区变形特征。在张富灵[29]、魏瑞琦[30] 对木鱼包滑坡变形特征分析的基础上，本研究以坡面交界处和地表冲沟为界，将木鱼包滑坡由东至西划分为东侧坡面(A 区)、主滑面东部(B 区)、主滑面西部(C 区)3 个分区。

滑体中部布设有 ZGX295、ZGX296、ZGX297、ZGX298 4 个全自动地表位移监测仪。工程地质剖面如图 2 所示，剖面滑床上部与岩体面倾角相近，呈直线，倾角 21° ~ 25°，下部滑床逐渐变缓。坡体前缘为一隆起平台，厚度为 80 ~ 120 m，明显厚于中后部 60 ~ 90 m 的滑体。滑坡体由 2 部分组成，滑体上层为第四纪松散堆积体；下层为侏罗系香溪组层状石英砂岩、碳质粉砂岩。

滑体前部滑带为黑色轻粉质壤土夹少量块碎石。滑体中、后部滑带为软弱的煤系地层。滑床主要由



A 区. 东侧坡面; B 区. 主滑面东部; C 区. 主滑面西部; 下同

图 1　木鱼包滑坡地理位置及概况

Fig. 1　Geographical location and overview of the Muyubao landslide

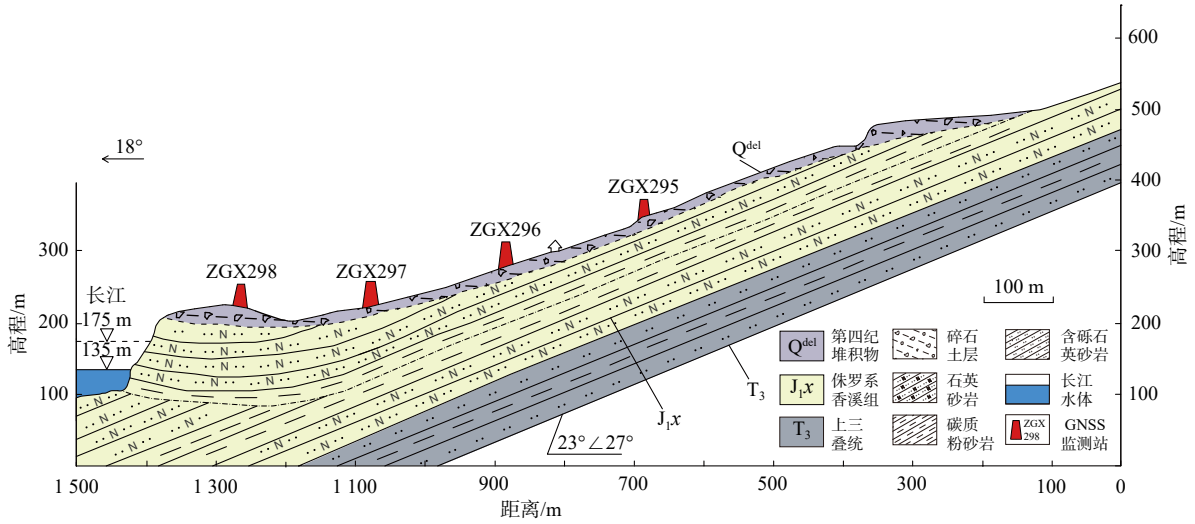


图 2　木鱼包滑坡工程地质剖面图

Fig. 2　Engineering geological profile of the Muyubao landslide

香溪组中、下段地层组成，在顺层滑动部分，滑床以香溪组碳质粉砂岩为主，切层部分由层状石英砂岩、含砾石英砂岩构成(图 2)。

本研究使用的 SAR 数据为 IW 模式的哨兵一号升轨数据，使用的 DEM 数据为美国国家航空航天局(NASA)发布的 30 m 分辨率的 SRTM 产品。哨兵数据共 158 幅，时间跨度为 2017 年 3 月 12 日至 2022 年 12 月 23 日。同时使用木鱼包滑坡上的 4 个自动 GNSS 监测点对 InSAR 处理的结果进行验证。

2 时序 InSAR 处理方法

2.1 时间序列 InSAR 技术

SBAS-InSAR 技术设定一定时间、空间基线阈值，将每幅影像与其阈值范围内的所有影像进行干涉配对[31]。将单次 D-InSAR 得到的形变结果作为观测值，根据最小二乘法则采用 SVD 分解获取高精度的形变时间序列。不依靠特定散射体面状成像，虽然在相位解缠方面存在一定的局限性，提取的形变数据存在一定的误差，但其结果拥有较大的信息量。

StaMPS-MTI[32-33]技术结合了 StaMPS-PS 和 StaMPS-SBAS 技术的优点[28]，同时利用了永久散射体(PS 点)和慢失相关滤波相位像素(SDFP 点)[34]。一方面设置主影像，利用基于雷达信号的幅度离差值识别 PS 点；另一方面设定时间、空间、相关性阈值，生成小基线干涉图，获取 SDFP 点。对 PS 点和 SDFP 点进行相位重构、比较、加权平均等处理，合并后作为候选点集。利用所有候选点的空间相关性，计算其时间相关性和相位噪声值。再根据每个候选点的信噪比，将信噪比低于阈值的候选点剔除，剩余的点构成相干点集[35]并利用三维相位解缠反演地表位移。StaMPS-MTI 技术在拥有较多的点位数量的同时，也能保证提取出的形变信息有足够的准确性，但其空间采样率依旧在一定程度上受候选点集的限制。

2.2 数据处理

本研究使用基于 Isce-StaMPS 的 StaMPS-MTI 技术和基于 GMTSAR 的 SBAS-InSAR 技术提取滑坡形变。SBAS-InSAR 技术结果覆盖较为全面，能够为滑坡各个区域的变形特征分析提供足够的数据；StaMPS-MTI 技术能够弥补 SBAS-InSAR 精度方面的不足，为滑坡定量分析足够准确的信息。

2 种技术方法选取相同配对方案，在控制基线较小的前提下，为了生成尽可能多的干涉图，选取时间、空间阈值分别为 200, 180，为防止较高时空阈值导致干涉图噪声增加，设置干涉像对的平均相干性阈值为 0.4，生成的时空基线如图 3 所示。

除个别外影像外，158 景影像皆生成了 3 张以上的干涉图。滑坡时序性分析对形变数据精度要求很高，为确保提取的形变足够准确，有效信息不会被噪声覆盖，在相位解缠和后续位移反演阶段，进行了多次参考，同时使用 GACOS 数据去除大气噪声。一次参考选取三峡大坝作为参考点消除误差。二次参考选择一次参考后年变化速率接近 0，且地理位置位于研究对象后缘山脊的 InSAR 点，在保证结果正确性的同时减小数据误差波动。

为进一步发挥 2 种时序 InSAR 技术点面结合的优势，在保证 SBAS-InSAR 留有充足信息量的前提下，对 StaMPS-MTI 选取了较小的幅度离差值(0.2)和标准差阈值(0.6)，在减少 InSAR 点数量加快解算速度的同时，提高候选点的平均质量，以此来提高时序曲线的准确性。

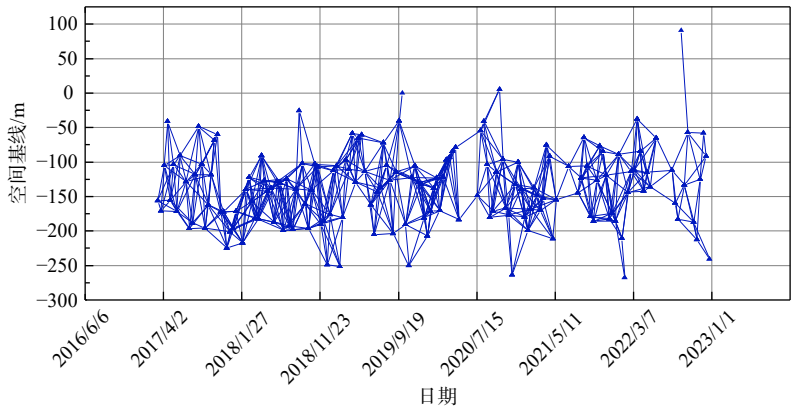


图 3 时空基线图

Fig. 3 Space-time baseline

3　木鱼包滑坡时空变形特征分析

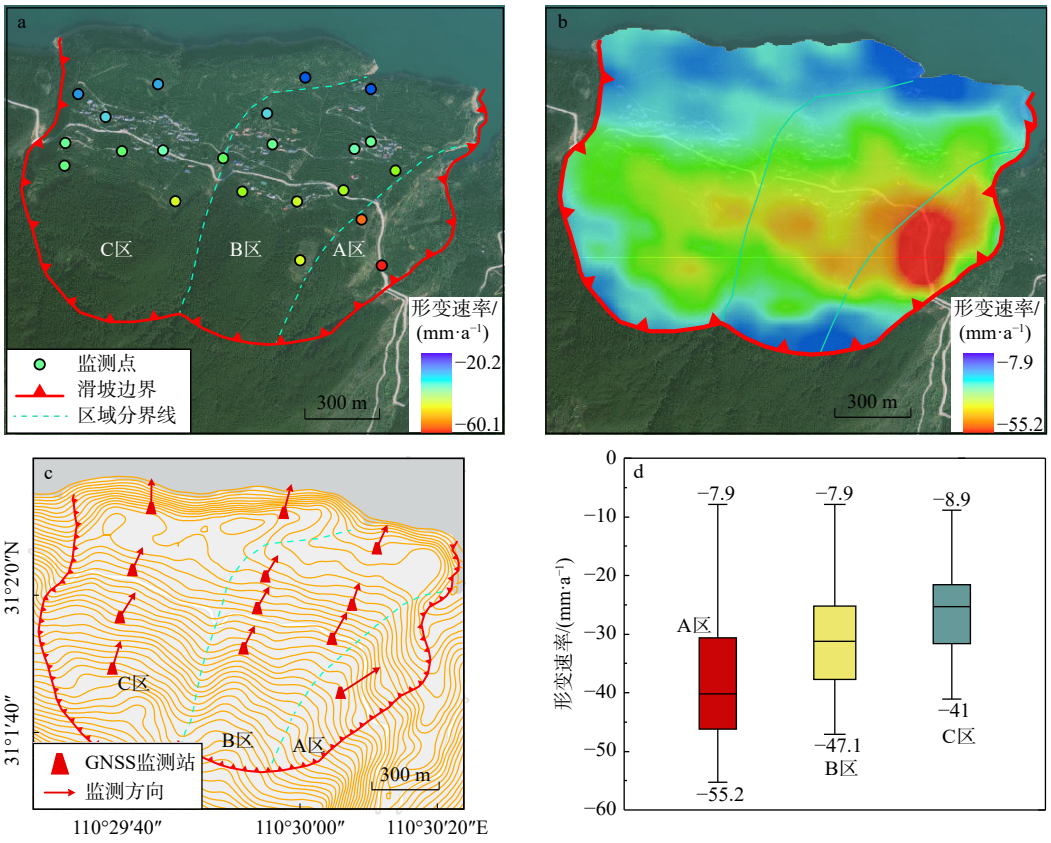
3.1　时序 InSAR 结果

根据时序 InSAR 结果，绘制了木鱼包滑坡 2017 年 3 月至 2022 年 12 月的年平均形变速率分布图（图 4）。如图 4 所示，基于 StaMPS-MTI 技术的木鱼包滑坡卫星视线向（Line of Sight，简称 LOS）形变速率为−20.2 ~ −60.1 mm/a；最大变形发生在滑坡右后方 A 区。基于 SBAS-InSAR 技术的形变速率为−7.9 ~ −55.2 mm/a。取 A、B、C 3 区 25% ~ 75% 年形变速率数据值为区间值，绘制了基于 SBAS-InSAR 的不同分区形变速率分布箱线图（图 4d）。分析得出在木鱼包滑坡各个分区中形变速率 A 区（−30.6 ~ −46.2 mm/a）>B 区（−25.2 ~ −37.8 mm/a）>C 区（−21.5 ~ −31.5 mm/a）。A、B、C 3 区强变形主要发生在各区域中后部，形变速率峰值分别为−55.2，−47.1，−41 mm/a；区域前缘较为稳定，最低值分别为−7.9，−7.9，−8.9 mm/a。2 种时序 InSAR 技术结果都反映出木鱼包滑坡整体存在一定的变形，且形变速率分布趋势右侧大于左侧，中后部大于前缘。A 区较大的形变速率一方面是其本身发生了较大的变形，另一方面由 GNSS 监测方向可知（图 4c），A 区滑移方向与 LOS 向夹角较小，投影过程中损失的形变值少于 B，C 2 区。

3.2　时序 InSAR 结果验证

InSAR 得到的形变数据是滑坡真实位移在卫星视线向（LOS）上的投影，正负代表滑坡位移方向与 LOS 向的正反，与 GNSS 监测数据方向不同。因此，为验证时序 InSAR 技术的可靠性，选取了 ZGX295，ZGX296，ZGX297，ZGX298 4 个自动 GNSS 监测数据，并将 GNSS 监测数据投影至与临近的 InSAR 点相同的方向进行对比，同时为方便对比将二者累积位移取绝对值。

如图 5 所示，4 组曲线在形态上具有一致性，都能在一定程度上反映滑坡变形的阶跃特征。分别计算 4 组曲线的 *RMSE*（均方根误差）、*MAE*（平均绝对误差）、余弦相似度和累计位移差，结果如表 1 所示。对比 StaMPS 技术得到的时序曲线与 ZGX295，ZGX296，ZGX297，ZGX298 4 组 GNSS 监测数据，均方根误差分别为 11.931 5，16.012 5，23.064 5，7.334 6 mm。在



a.基于 StaMPS-MTI 的形变速率分布图；b. 基于 SBAS-InSAR 的形变速率分布图；c. GNSS 监测方向图；d. 基于 SBAS-InSAR 的不同分区形变速率分布箱线图

图 4　木鱼包滑坡 2017 年 3 月−2022 年 12 月时序 InSAR 结果图

Fig. 4　Time-series InSAR results map of the Muyubao landslide from March 2017 to Decemeber 2022

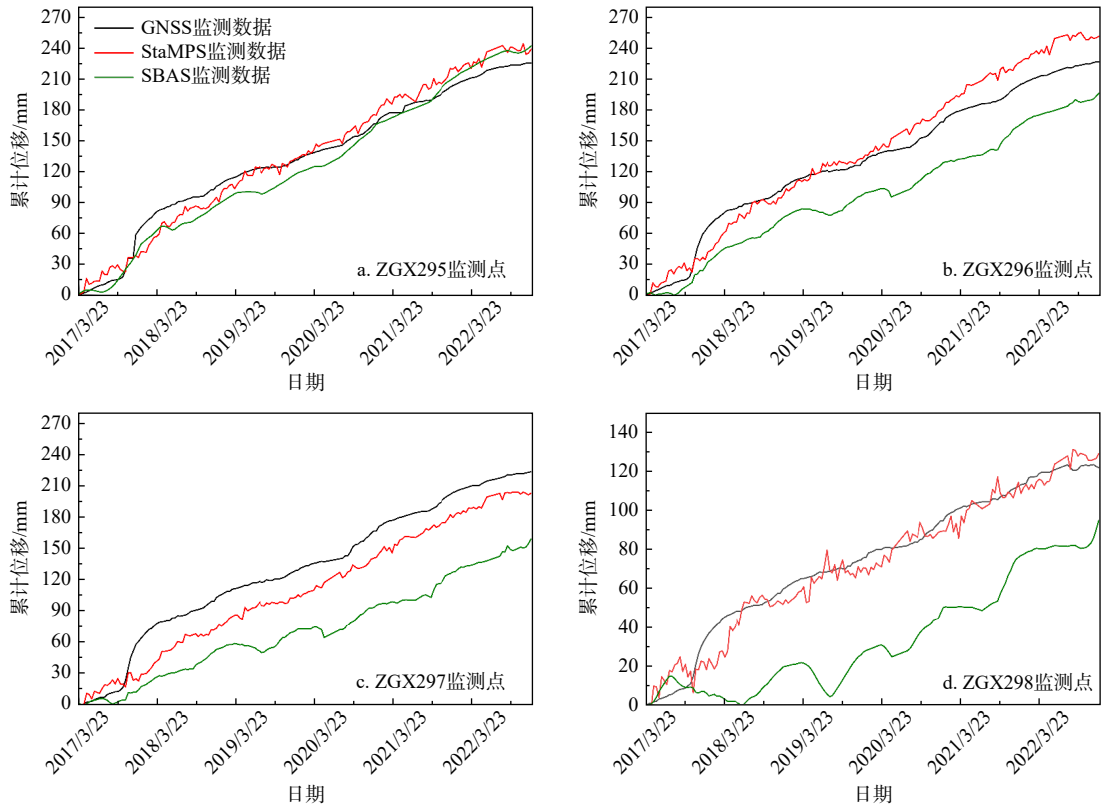


图 5　木鱼包滑坡时序曲线结果对比图

Fig. 5　Time series curve results comparison diagram of the Muyubao landslide

表 1　木鱼包滑坡时序曲线结果对比表

Table 1　Time series curve results comparison table of the Muyubao landslide

监测站点	*RMSE*/mm		*MAE*/mm		余弦相似度		累计位移差/mm	
	StaMPS	SBAS	StaMPS	SBAS	StaMPS	SBAS	StaMPS	SBAS
ZGX295	11.9315	14.6127	10.0547	12.2512	0.9973	0.9947	13.2312	16.4967
ZGX296	16.0125	34.8575	13.2624	33.243	0.9973	0.9951	24.7207	30.2178
ZGX297	23.0645	60.3476	21.7981	56.6074	0.9959	0.9886	20.3274	64.2438
ZGX298	7.3346	43.1930	5.8499	40.2692	0.9960	0.9318	7.0869	26.9161

此基础上，计算 StaMPS 曲线与 GNSS 曲线的 R^2(拟合优度)结果见表 2，4 组曲线的拟合优度都大于 0.85，表明 StaMPS-MTI 技术得到的 InSAR 数据具有一定的可靠性，其时序曲线可以用于研究滑坡时间变化特征。SBAS-InSAR 技术得到的均方根误差分别为 14.6127, 34.8575, 56.6074, 43.193 mm，随着 InSAR 点与参考点距离的增加(参考点位于后缘山脊)，均方根误差逐渐增大，这是由于 SBAS-InSAR 技术信息量较多，在解缠过程中信号的路径长度增加使得干涉图中的相位变化变得更加复杂，从而导致部分区域误差较大。SBAS-InSAR 曲线与 GNSS 曲线的余弦相似度分别为 0.9947, 0.9951, 0.9886, 0.9318，这说明 2 组曲线的总体变化趋势相近。SBAS-InSAR 得到数据虽然在个别点位存在一定的误差，但可以在一定程度上反映滑坡的变形特征。综上所述，2 种时序 InSAR 技术都能对坡体变形进行有效监测，SBAS-InSAR 得到的形变结果信息量多，覆盖面广，StaMPS-MTI 技术得到的时序曲线准确性高、误差小。因此，本研究将 2 种时序 InSAR 技术进行互补应用对木鱼包滑坡的时空变化特征进行研究。

表 2　StaMPS 曲线与 GNSS 曲线拟合优度表

Table 2　Goodness of fit table of StaMPS curve and GNSS curve

监测站点	ZGX295	ZGX296	ZGX297	ZGX298
拟合优度R^2	0.9644	0.9360	0.8666	0.9558

3.3　滑坡变形模式分析

SBAS-InSAR 技术得到的形变结果信息量大、准确性相对较低，StaMPS-MTI 技术得到的形变结果

受限于点位数量、准确性较高。因此本研究使用 SBAS-InSAR 技术获取的形变结果对木鱼包滑坡时空变形特征和变形模式进行初步的分析和总结；使用 StaMPS-MTI 技术获取的形变信息对 SBAS-InSAR 得到的结论进行验证，并在此基础上进行进一步的定量分析。

3.3.1　SBAS-InSAR 形变结果滑坡变形模式分析

基于 SBAS-InSAR 结果，绘制了木鱼包滑坡 2017 年 3 月至 2022 年 9 月每半年累积位移增量图（图 6）。如图 6 所示，木鱼包滑坡存在明显的分区、分阶段变形特征。每年 3 月至 9 月为蠕滑变形阶段，滑坡以局部变形为主，整体较为稳定。在 2017−2020 年，局部变形主要发生滑坡右后方 A，B 2 区，2020 年后 C 区后缘开始产生变形。9 月至次年 3 月为整体变形阶段，木鱼包滑坡整体发生位移。

木鱼包滑坡是浮托减重型滑坡，其变形主要受降雨、库水两大因素影响[36]。三峡库区水位每年升降范围在 145 ~ 175 m 之间，整体变形阶段对应三峡库区库水位上升期和高水位运行期，在此期间滑坡受降雨与库水的共同作用；蠕滑变形阶段对应库水位下降期和低水位运行期，下降期库水与降雨成为坡体变形的主要因素。

在前期有效降雨的持续影响下，只要前期有效降雨达到临界降雨阈值，即使滑坡发生当天的降雨量很小，也可以诱发滑坡变形[37-38]，因此以月峰值降雨反映降雨强度。在图 6 的基础上，统计整体变形阶段（每年 9 月至次年 3 月）中高水位（≥165 m）、高水位（≥170 m）累计天数、月峰值降雨与平均累计位移增量的关系，结果见表 3。如表 3 所示，时段②高库水累积天数、月峰值降雨、平均累计位移增量分别为 131 d、208.6 mm、−29.9 mm，时段④分别为 130 d、138.2 mm、−22.1 mm。2 个时段库水条件相近，时段②变形更大，这说明在整体变形阶段降雨会对滑坡变形起助推作用。时段⑥高库水累计天数、月峰值降雨量、平均累计位移增量分别为 96 d、163.2 mm、−18.0 mm，对比时段④，其降雨强度更大、高水位浸润时间更短、平均累计位移增量更小，这说明库水对滑坡变形的影响大于降雨。

时段⑧中高水位累计天数高达 175 d，月峰值降雨量仅有 51.4 mm，降雨对变形的影响很小。其平均累计形变位移−29.1 mm 仅次于时段②。由图 6 可知，时段②与时段⑧变形特征不同，时段②由强降雨和库水耦合引起的大尺度变形主要集中在坡体中后部，且滑坡右后方位移增量明显偏大；时段⑧为纯库

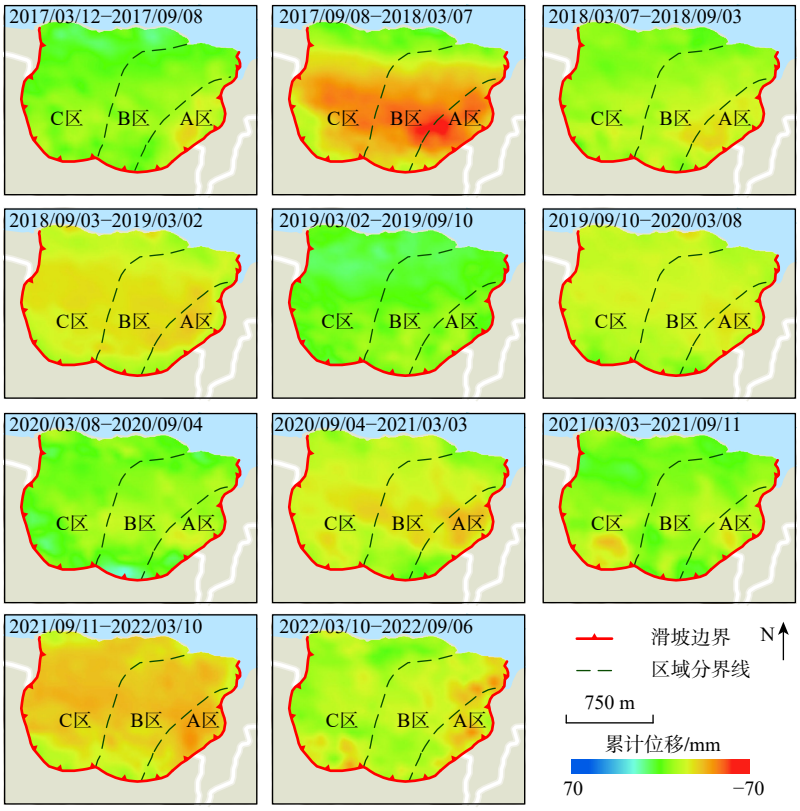


图 6　木鱼包滑坡累计位移增量图

Fig. 6　Cumulative displacement increment diagram of the Muyubao landslide

表 3　整体变形阶段统计表

Table 3　Statistical table of overall deformation stage

时段序号	时间	中高水位(≥165 m)累计天数/d	高水位(≥170 m)累计天数/d	月峰值降雨量/mm	平均累计位移增量/mm
②	2017/09/08-2018/03/07	159	131	208.6	−29.9
④	2018/09/03-2019/03/02	155	130	138.2	−22.1
⑥	2019/09/10-2020/03/08	148	96	163.2	−18.0
⑧	2020/09/04-2021/03/03	152	124	161.6	−19.3
⑩	2021/09/11-2022/03/10	175	124	51.4	−29.1

表 4　蠕滑变形阶段统计表

Table 4　Statistical table of creep deformation stage

时段序号	时间	库水下降期中水位(≥160 m)累计天数/d	月峰值降雨量/mm	平均累计位移增量/mm	累计位移增量峰值/mm
①	2017/03/12-2018/09/08	53	数据缺失	−5.9	−28.9
③	2018/03/07-2018/09/03	60	233.0	−12.8	−29.4
⑤	2019/03/02-2019/09/10	38	183.6	−0.8	−15.5
⑦	2020/03/08-2020/09/04	49	256.6	−6.0	−23.5
⑨	2021/03/03-2021/09/11	55	146.6	−8.5	−33.3
⑪	2022/03/10-2022/09/06	71	177.6	−16.8	−41.4

水作用下产生的变形，包括前缘阻滑块体在内的滑坡整体都发生了位移。

蠕滑变形阶段存在由降雨和下降期库水导致的小幅度整体变形和部分区域局部变形。以平均累计位移增量(以下称增量均值)反映滑坡整体变形程度，以平均累计位移增量与累计位移增量峰值的差值(以下称位移增量差值)反映滑坡局部变形强度。统计蠕滑变形阶段每个时段对应的库水位下降期中水位(≥160 m)累计天数(以下称累计天数)、月峰值降雨量、增量均值、累计位移增量峰值，并计算位移增量差值，结果见表 4，图 7。

如图 7，表 4 所示，代表滑坡整体变形程度的增量均值与累计天数成正比，变形存在一个明显的 0.8 mm 作为基准线，在 2017−2022 年的其余 5 个蠕滑“启动”过程。以时段⑤累计天数 38 d、增量均值 −0.8 mm 作为基准线，在 2017−2022 年的其余 5 个蠕滑变形阶段中，累计天数每增大 1 d，对应的累计位移均值分别增加 0.36，0.54，0.47，0.45，0.52 mm。由此推测，木鱼包滑坡在库水下降期的整体变形启动时间约为 36 d，在 36 d 后以 0.47 mm/d 左右的速度持续变形直至水位下降到 160 m 以下。时段③、时段⑦月峰值降雨量超过 200 mm，但其对应的增量均值并未有明显偏大的趋势，这说明在常规条件下，单一降雨因素无法导致滑坡发生整体变形。

结合图 6，7 可知，在 2020 年局部变形范围增大之前，局部变形主要发生在 A 区和 B 区中部。月峰值降雨量与位移增量差值成正比，说明强降雨是木鱼包发生局部滑移的主要因素。在 2020 年后，C 区后缘与 B 区右前部开始出现明显的变形，同时位移增量差值相较 2020 年之前明显增大。产生这种现象的原因很可能是，时段⑦高达 256.6 mm 的强降雨导致 C 区后缘土体软化，使上覆浅层土体在时段⑧跟随下伏岩体整体变形过程中产生拉裂破坏，土体强度进一步降低，开始在每年雨季出现独立于岩体的大尺度变形。

综上所述，关于木鱼包滑坡变形模式可以得出以下结论：

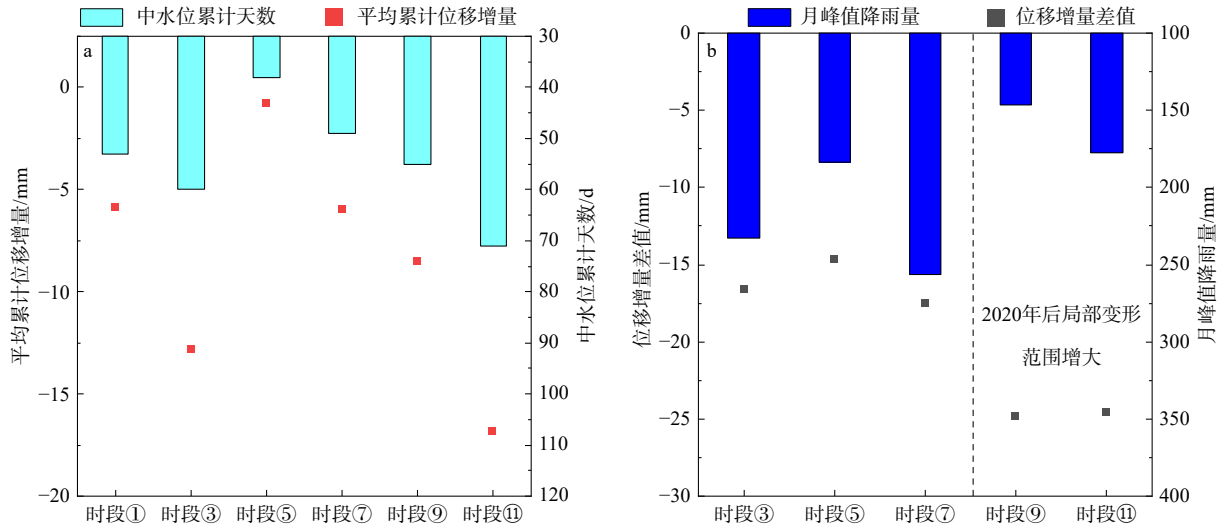


图 7　蠕滑变形阶段中位数累计天数−平均累计位移增量 (a) 及月峰值降雨量−位移增量差值 (b) 图

Fig. 7　Accumulated days-displacement increment (a) and monthly peak rainfall-displacement increment difference (b) in creep deformation stage

(1)木鱼包滑坡变形以半年为周期，主要分为 2 个阶段：整体变形阶段、蠕滑变形阶段。

(2)在整体变形阶段，滑坡平均累计位移增量较大，在此过程中库水和降雨共同作为影响因素，库水影响大于降雨，且由纯库水作用引起的滑坡变形和在降雨−库水耦合作用下的滑坡变形存在不同的空间分布特征。

(3)在蠕滑变形阶段，中水位累计天数决定滑坡整体变形程度，整体变形存在约 36 d 的启动时间；降雨强度决定局部变形程度，高强度降雨会对滑坡造成永久性破坏。

木鱼包滑体由上部浅层土体和下伏岩体 2 部分组成。当阻滑块体在水体浮力、动水压力等作用下抗滑能力减弱时，下层滑体带动上层堆积体使滑坡整体滑移。强降雨在高水位期入渗岩体使地下水位升高，促进整体变形的发生，同时作用于浅层土体和破碎岩体导致滑坡发生局部变形。根据是否会因降雨发生局部变形，可以将滑坡分为局部变形区和非局部变形区。由图 6 所示，目前木鱼包滑坡局部变形区主要包括 A 区中部和前部、B 区右中部和右前部、C 区后部。

需要注意的是，由图 5 对比验证结果可知，在部分点位 SBAS-InSAR 得到的形变数据与 GNSS 数据曲线趋势一致，但数值偏低。上述数据中的累计位移增量与真实值相比可能偏小。因此，使用准确性更高的 StaMPS-MTI 技术对时序曲线进行定量分析，同时对上述结论进行验证。

3.3.2　StaMPS-MTI 形变结果滑坡变形模式分析

基于 StaMPS-MTI 技术获取的滑坡累计位移曲线，在滑坡 3 个区域上选取了如图 8 所示的 12 个 InSAR 控制点。在 SBAS-InSAR 结果分析的基础上，结合 StaMPS-MTI 获取的时序形变曲线和降雨量、库水位数据(累计位移取绝对值)，对滑坡不同位置进行分析。为减少误差造成的影响，在令控制点尽可能分散的前提下，将所有控制点都选择在房屋、道路、裸地等植被覆盖较少的区域。

12 个控制点的累计位移变化都表现出与库水位的高度相关性，位移曲线随库水周期性变动在高水位运行期和库水下降期表现出阶跃特征。从时序曲线上看单一库水作用并不会导致滑坡前后缘产生位移差。以 B 区为例，2017 年 9 月 8 日至 2018 年 5 月 6 日，总累计降雨量 697.8 mm，月峰值降雨量 208.6 mm，在降雨和库水的共同作用下平均位移差值(P3 控制点与 P4 ~ P9 控制点差值的平均值)由 1.9 mm 增加为 14.4 mm；2021 年 9 月 11 日至 2022 年 5 月 9 日，滑坡所在区域总累计降雨量 264 mm，月峰值降雨量 51.4 mm，滑坡受降雨影响很小，平均位移差值近乎保持不变，由 36.0 mm 增加为 36.4 mm。

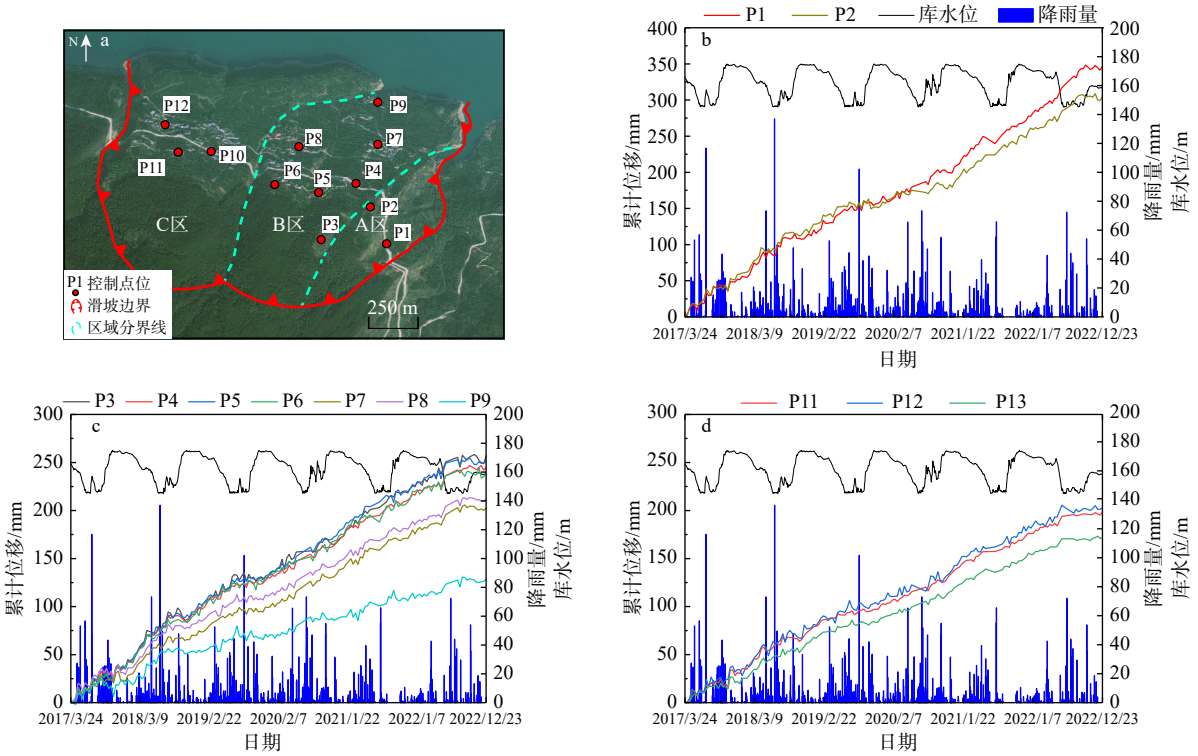


图 8　木鱼包滑坡控制点分布 (a) 及其时序曲线 (b ~ d)

Fig. 8　Control point distribution (a) and time-series curve (b-d) of the Muyubao landslide

由此可见滑坡在库水作用下发生整体变形。

滑坡不同时段不同区域对降雨响应程度不同，在高水位运行期和库水下降期，12 个控制点都表现出受强降雨影响位移明显偏大的趋势，但增大的幅度并不相同。在 2017 年 9 月至次年 5 月，连续强降雨导致全部位移曲线均发生了明显变化，但变形最大的 P1, P2, P3 控制点位移增量分别高达 49.3, 54.2, 43 mm，而 P7, P8 控制点位移增量仅有 23, 27 mm，这说明降雨一方面对库水作用下滑坡的整体变形起助推作用，另一方面导致部分区域发生局部变形。在低水位运行期，这些局部变形区伴随降雨出现明显的位移增大现象，2021 年 7 月 1 日至 2021 年 9 月 11 日，库水在低水位平稳运行，146.6 mm 的月峰值降雨量使 P1, P2, P3, P4, P5, P11 控制点均出现了 10 mm 以上（10.6 ~ 14.7 mm）的位移增量。因此，当滑坡所在地区出现强降雨时，应对局部变形区进行重点关注。由 StaMPS-MTI 时序曲线得到的结论与上文使用 SBAS-InSAR 得到的结论高度一致，进一步说明了 2 种技术的可靠性和结论的准确性。

为更进一步研究木鱼包滑坡时间变形特征，在 A, B, C 3 区分别选取 P1, P4, P12 3 个控制点在 2018 年 7 月至 2019 年 10 月的时序变形曲线进行定量分析，绘制了控制点位移−库水位−降雨曲线（图 9）。

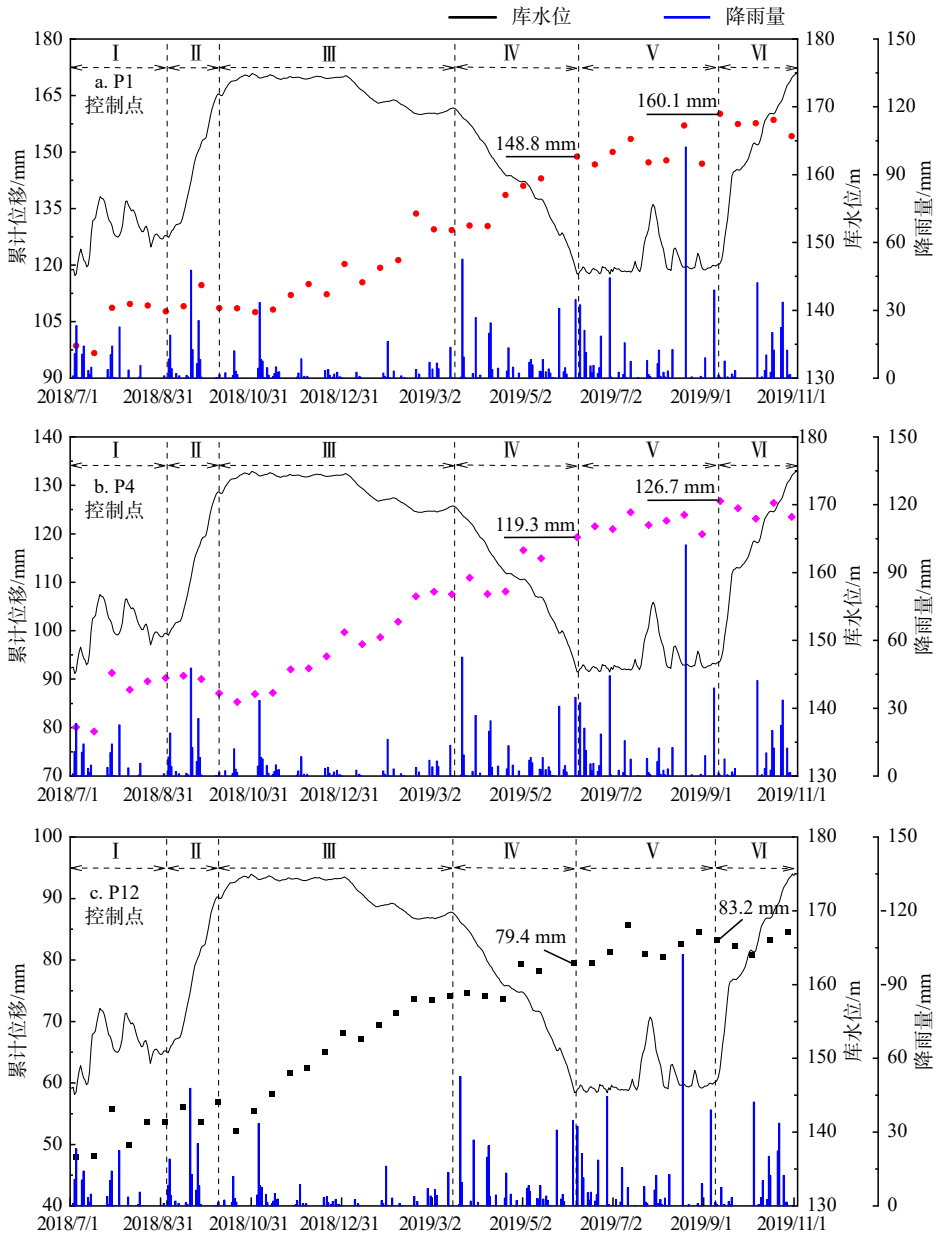
按照库水运动情况将曲线划分为 6 个阶段。其中Ⅰ，Ⅴ阶段为低水位运行期，Ⅱ，Ⅵ阶段为库水位上升期，Ⅲ阶段为高水位运行期，Ⅳ阶段为库水位下降期。如图 9 所示，3 个控制点的整体变形趋势一致，时序曲线表现出标准的浮托减重型滑坡变形特点，大幅度变形主要发生在第Ⅲ阶段高水位运行期。在此阶段降雨较小，滑坡受单一库水因素影响，曲线先陡后缓，位移速率与水位高度成正比。当水位升至 175 m，3 条曲线的累计位移开始不断增大，2018 年 10 月 21 日至 2019 年 1 月 1 日 P1, P4, P12 控制点位移增量分别为 11.8, 14.5, 15.9 mm。当水位从 175 m 下降至 170 m 后，位移速率开始减小，直至水位下降至 168 m，累计位移不再增大，曲线近乎平直。由此可见浮托减重导致坡体变形的库水位阈值在 168 m 左右。在库水位下降期，水位再次开始下降，浮托减重作用进一步减小，但快速下降的库水导致坡体产生指向坡外的动水压力。与由 SBAS-InSAR 发现的启动现象类似，在第Ⅳ阶段 3 条时序曲线的累计位移先保持不变再突然增大，在 2019 年 4 月 19 日 3 条曲线出现小幅度的阶跃现象。由前人研究可知，由动水压力导致的滑坡变形存在滞后性[39]，因此在库水位下降期，坡体变形需要启动时间的根本原因是，在水位下降至 168 m 后，单一浮托减重作用已经无法撼动前缘的阻滑块体，致使高水位运行末期控制点累计位移不再增加，当水位进入库水位下降期后，动水压力开始辅助浮托减重作用，使滑坡再次发生整体变形。动水压力作用于滑坡变形存在滞后时间，使库水位下降期滑坡位移先不变再升高，曲线出现阶跃式变形。随着水位的进一步下降，浮托减重作用不断降低，单一动水压力作用无法推动整个滑坡，因此在库水位下降期只发生一次阶跃。从 3 月 14 日进入库水位下降期直至 4 月 19 日坡体发生变形共历时 36 d，由此可知，动水压力的滞后时间在 36 d 左右，与 SBAS-InSAR 得出的启动时间一致。结合前文在库水位下降期，中水位累计天数决定滑坡整体变形程度的结论，在这个浮托减重和动水压力复合作用的过程中，160 m 以上水位提供的水体浮力占主导地位，是坡体发生变形的必要条件。

在第Ⅴ阶段，库水处于低水位运行期，降雨是滑坡变形的主要影响因素，如图 9 所示，在此期间 P1, P4, P12 3 个控制点，位移增量分别为 11.3, 7.4, 3.8 mm，P1 控制点明显对降雨更为敏感。2019 年 6 月 6 日至 7 月 12 日，累计降雨量 176.2 mm，日峰值降雨量 44.4 mm，P1 控制点位移增量 4.6 mm。7 月 12 日至 9 月 10 日，累计降雨量 210.2 mm，日峰值降雨量 102.2 mm，P1 控制点位移增量 6.7 mm。位移增量与累计降雨量成正比，发生在 8 月 18 日的强降雨并未导致累计位移明显增大，这说明相比短时间内的强降雨，长期持续降雨对局部变形影响更大。

3.4 滑坡区域变形特征分析

基于 SBAS-InSAR 获取的木鱼包滑坡形变速率，在滑坡的 3 个区域分别选取了如图 10 所示的 3 条剖面线，对滑坡不同区域空间变形特征进行研究。剖面线的方向与区域位移方向平行，由区域后缘边界延伸至前缘临空面或冲沟。

B 区位于主滑面东部，滑移方向约 18°，如图 10c 所示，剖面Ⅱ-Ⅱ′形变速率在−14.9 ~ −42.2 mm/a 之间。B 区坡面上陡下缓，中后部倾斜岩体作为驱动块体在下滑力作用下向前推移，前部平缓岩体与隆起地形组成锁固段与阻滑块体。结合上文中木鱼包滑坡变形模式分析，降雨导致浅层土体和破碎岩体发生局部变形使强变形区发育，越靠近锁固段位移量越小，而阻滑块体前缘的受蚀崖岸由于长期受到库水侵蚀且具有良好的临空条件导致位移量增大[40]。强变形区主要集中在滑坡中后部与前缘受蚀



Ⅰ ~ Ⅵ为库水位运动曲线划分的 6 个阶段

图 9　控制点位移–库水位–降雨曲线

Fig. 9　Control point displacement-reservoir water level-rainfall curve

崖岸。坡面滑动受阻整体稳定性较好，产生大规模滑动的可能性较小，但前缘崖岸在库水作用下出现块石崩落现象(图 11c)，这部分区域需要重点关注。

A 区滑移方向 53°，后部区域坡度约 15°，前部区域坡度约 23°。如图 10b 所示，剖面 Ⅰ – Ⅰ′ 形变速率在−20.1 ~ −54.3 mm/a 之间。形变速率从后缘至前缘先增大再减小。木鱼包滑坡上层滑体为第四纪松散堆积物，下层层状滑体原岩为香溪组石英砂岩、含砾石英砂岩，其前部相对破碎，中后部较为完整，西部较完整，东侧相对破碎。中后部岩体产状与未滑动基岩基本一致，岩体完整性较好，力学强度较高[29]。A 区岩土体较为破碎，其形变速率峰值位于前后坡面交界处，剖面中部坡度的变化和人类活动造成的坡体抗剪强度降低为局部变形提供了条件，使强形变区发育。A 区坡体前缘为木鱼包古滑坡向前推移与谭家河滑坡产生错动形成的冲沟，虽然前缘受阻使 A 区较大的变形并未对木鱼包滑坡的整体稳定性造成影响，但强形变区的大幅度位移，使之与后缘产生了拉裂，与前缘周围区域发生了挤压错动。曾多次发生局部坍塌、公路拉裂等不良地质现象(图 11a, b)。

C 区位于主滑面西部，滑移方向约 12°，如图 10d

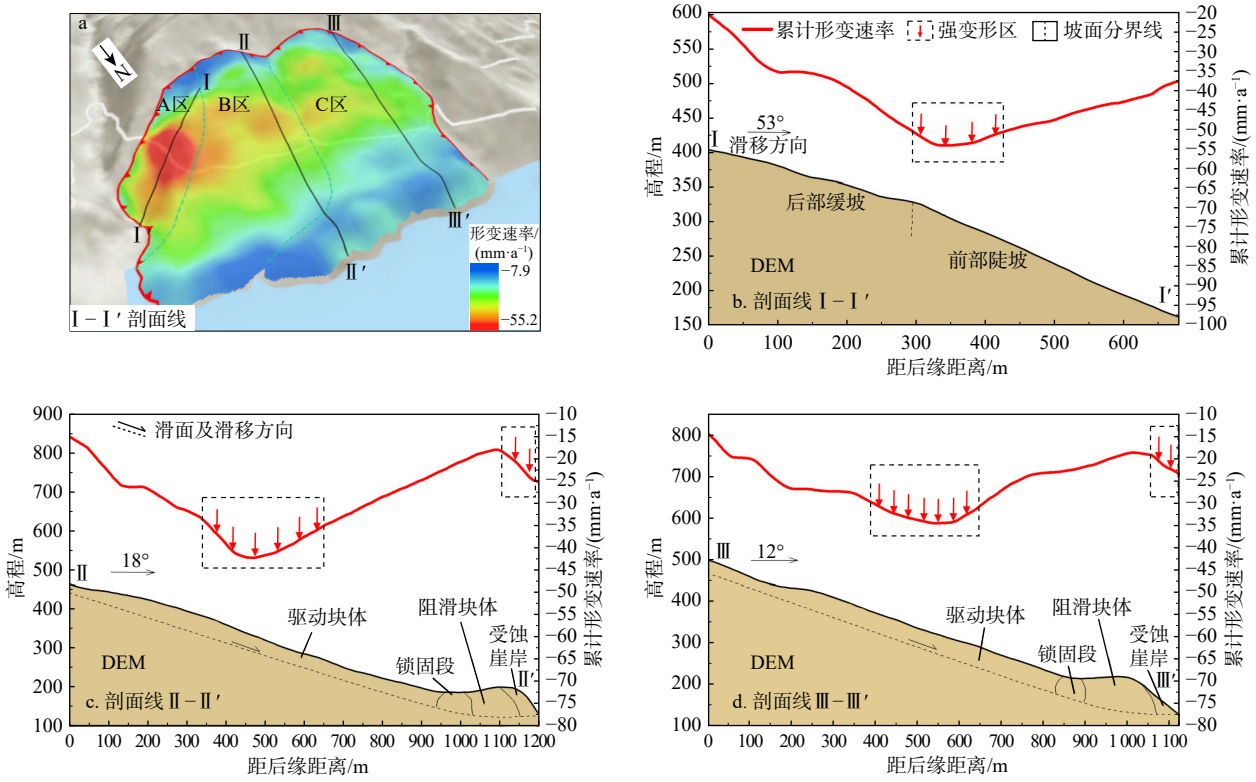


图 10　木鱼包滑坡剖面线位置 (a) 及累计形变速率 (b ~ d) 图

Fig. 10　Profile line position (a) and cumulative deformation rate diagram (b-d) of the Muyubao landslide



a. A 区中部局部坍塌; b. A 区中部公路拉裂; c. B 区前缘块崩落; d. C 区后部建筑错动

图 11　木鱼包滑坡局部变形现象图

Fig. 11　Local deformation phenomenon diagram of the Muyubao landslide

所示, 剖面Ⅲ-Ⅲ′形变速率在−14.5 ~ −34.8 mm/a 之间。C 区变形特征与 B 区相似, 但整体形变速率小于 B 区。其前缘阻滑块体更厚, 拥有更强的抗滑能力。剖面Ⅲ-Ⅲ′受局部变形影响较小, 其位移主要由下层岩体带动滑坡发生整体变形产生, 形变曲线较为平直。剖面Ⅲ-Ⅲ′左侧后部在 2020 年后出现局

部变形现象，位移速率明显增大，同年观察到在新增局部变形区发生了建筑错动(图 11c)、树木倒塌等现象[29]。

综上所述，A、B、C 3 区空间变形特征存在显著差异，造成这种的差异的主要原因是各区域地质环境的不同以及由此引发的局部变形现象的发生。相比 B、C 2 区较为完整的岩体和前缘弯曲反倾的地形，A 区相对破碎的岩土体与较为倾斜顺直的地形更容易在外界因素的影响下发生变形。C 区更为厚实的阻滑块体也使其平均变形速率小于 B 区；坡度、岩体完整性、坡面形态等不同地质环境，使 A、B、C 3 区发生了不同程度的局部变形。坡体的局部变形一方面使所在区域变形增大，另一方面对周围区域造成影响，进一步加大了 3 区空间变形特征的差异。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 通过对比分析，InSAR 处理结果与 GNSS 监测结果较吻合，2 种时序 InSAR 技术各有优劣：SBAS-InSAR 面状成像信息量较多但曲线准确度稍差；StaMPS-MTI 曲线准确度较高但受限于点位数量。将 2 种时序 InSAR 技术进行互补运用可以作为滑坡监测和滑坡机理分析的可靠手段。

(2) 2 种时序 InSAR 技术结果都反映出木鱼包滑坡的空间变形特征。基于 StaMPS-MTI 技术的木鱼包滑坡卫星视线向形变速率为−20.2 ~ −60.1 mm/a，最大变形发生在滑坡右后方 A 区；基于 SBAS-InSAR 技术的木鱼包滑坡卫星视线向形变速率为−7.9 ~ −55.2 mm/a，在各个分区的形变速率区间值表现为：A 区(−30.6 ~−46.2 mm/a)>B 区(−25.2 ~−37.8 mm/a)>C 区(−21.5 ~ −31.5 mm/a)。

(3) 木鱼包滑坡变形受降雨和库水影响分为整体变形和局部变形。在高水位运行期，滑坡受浮托减重作用发生整体变形，库水阈值约为 168 m。强降雨入渗岩体使地下水位升高，对整体变形起助推作用的同时，作用于浅层土体和破碎岩体导致滑坡发生局部变形。在库水位下降期，滑坡同时受浮托减重和动水压力作用，在此期间浮托减重作用占主导地位，动水压力存在 36 d 左右的滞后时间。在低水位运行期和库水位上升期，滑坡整体变形不再发生，强降雨使局部变形区发生变形。

(4) 目前 A 区中部和前部、B 区右中部和右前部、C 区后部等局部变形区已出现局部坍塌、房屋错动、公路拉裂等不良地质现象，当出现长期持续降雨时应对这些区域进行重点关注。

4.2 未来展望

目前研究仍存在一定的局限性，基于已有研究工作，今后将从以下 2 个方面继续深入研究：

(1)本研究结合 SBAS-InSAR 和 StaMPS-MTI 2 种技术的优点对木鱼包滑坡时空变形特征进行了分析，并未从技术角度对 2 种方法进行融合，后续研究中将尝试使用 StaMPS-MTI 技术得到的形变结果对 SBAS-InSAR 结果进行修正，将 2 种方法进行技术层面的融合和结合。

(2)本研究使用单一哨兵一号升轨数据源提取木鱼包滑坡卫星视线向形变，后续研究中将联合多种 SAR 数据源进行滑坡三维形变反演。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 唐辉明. 重大滑坡预测预报研究进展与展望 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(6): 1-13.
TANG H M. Advance and prospects of major landslides prediction and forecasting[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 1-13. (in Chinese with English abstract)

[2] 殷坤龙, 张桂荣. 地质灾害风险区划与综合防治对策 [J]. 安全与环境工程, 2003, 10(1): 32-35.
YIN K L, ZHANG G R. Risk zonation of geo-hazards and its comprehensive control[J]. Safety and Environmental Engineering, 2003, 10(1): 32-35. (in Chinese with English abstract)

[3] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状及问题 [J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082.
HUANG R Q, XIANG X Q, JU N P. Assessment of China's regional geohazards: Present situation and problems[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(11): 1078-1082. (in Chinese with English abstract)

[4] 朱鸿鹄, 王佳, 李厚芝, 等. 基于数据挖掘的三峡库区特大滑坡变形关联规则研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1517-1527.
ZHU H H, WANG J, LI H Z, et al. Association rule analysis for giant landslide deformation of the Three Gorges Reservoir region based on data mining[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1517-1527. (in Chinese with English abstract)

[5] 徐潇宇. 三峡库区地质灾害防治系统运行机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2013.
XU X Y. Research on the operation mechanism of the system dealing with the prevention and control of geological hazards in Three Gorges Reservoir area[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2013. (in Chinese with English abstract)

[6] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望 [J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.

LI Z H, ZHU W, YU C, et al. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping: Opportunities, challenges and the outlook[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1485-1519. (in Chinese with English abstract)

[7] 唐亚明, 张茂省, 薛强, 等. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述 [J]. 地质论评, 2012, 58(3): 533-541.
TANG Y M, ZHANG M S, XUE Q, et al. Landslide monitoring and early-warning: An overview[J]. Geological Review, 2012, 58(3): 533-541. (in Chinese with English abstract)

[8] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天–空–地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Q, DONG X J, LI W L. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966. (in Chinese with English abstract)

[9] 张毅. 基于 InSAR 技术的地表变形监测与滑坡早期识别研究: 以白龙江流域中游为例 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
ZHANG Y. Detecting ground deformation and investigating landslides using InSAR technique: Taking middle reach of Bailong River Basin as an example[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese with English abstract)

[10] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.

[11] 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): 2375-2383.

[12] HOOPER A, ZEBKER H, SEGALL P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(23): 1-5.

[13] 张亚迪, 李煜东, 董杰, 等. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患 [J]. 遥感学报, 2019, 23(5): 987-996.
ZHANG Y D, LI Y D, DONG J, et al. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2019, 23(5): 987-996. (in Chinese with English abstract)

[14] ZHOU C, CAO Y, YIN K L, et al. Landslide characterization applying Sentine l-1 images and InSAR technique: The Muyubao landslide in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Remote Sensing, 2020, 12(20): 3385.

[15] 朱同同, 史绪国, 周超, 等. 利用 2016–2020 年 Sentine l-1 数据监测与分析三峡库区树坪滑坡稳定性 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(10): 1560-1568.
ZHU T T, SHI X G, ZHOU C, et al. Stability monitoring and analysis of the Shuping landslide in the Three Gorges area with Sentine l-1 images from 2016 to 2020[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(10): 1560-1568. (in Chinese with English abstract)

[16] ZHANG T T, LI B, GAO Y, et al. Massive glacier-related geohazard chains and dynamics analysis at the Yarlung Zangbo River downstream of southeastern Tibetan Plateau[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(11): 426.

[17] ZHANG X C, CHEN L X, ZHOU C. Deformation monitoring and trend analysis of reservoir bank landslides by combining time-series InSAR and Hurst index[J]. Remote Sensing, 2023, 15(3): 619.

[18] 范景辉, 邱阔天, 夏耶, 等. 三峡库区范家坪滑坡地表形变 InSAR 监测与综合分析 [J]. 地质通报, 2017, 36(9): 1665-1673.
FAN J H, QIU K T, XIA Y, et al. InSAR monitoring and synthetic analysis of the surface deformation of Fanjiaping landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(9): 1665-1673. (in Chinese with English abstract)

[19] 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): 996-1007.
ZHAO C Y, LIU X J, ZHANG Q, et al. Research on loess landslide identification, monitoring and failure mode with InSAR technique in Heifangtai, Gansu[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 996-1007. (in Chinese with English abstract)

[20] 朱智富, 甘淑, 张荐铭, 等. 结合 SBAS-InSAR 技术及信息熵的苍山地质滑坡隐患识别 [J]. 测绘通报, 2022(11): 13-19.
ZHU Z F, GAN S, ZHANG J M, et al. Identification of geological potential landslides in Cang Mountain by combining SBAS-InSAR technique and information entropy[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(11): 13-19. (in Chinese with English abstract)

[21] TSIRONI V, GANAS A, KARAMITROS I, et al. Kinematics of active landslides in Achaia (Peloponnese, Greece) through InSAR time series analysis and relation to rainfall patterns[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 844.

[22] 赵蓓蓓, 黄海峰, 邓永煌, 等. 基于 Sentine l-1A 的三峡库区范家坪滑坡 InSAR 监测分析 [J]. 人民长江, 2022, 53(10): 103-107.
ZHAO B B, HUANG H F, DENG Y H, et al. InSAR monitoring analysis on Fanjiaping landslide in Three Gorges Reservoir area based on Sentine l-1A[J]. Yangtze River, 2022, 53(10): 103-107. (in Chinese with English abstract)

[23] 包馨, 张瑞, 刘安梦云, 等. 联合升降轨时序 InSAR 的金沙江滑坡群隐患识别 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(11): 1135-1145.
BAO X, ZHANG R, LIU A M Y, et al. Identification of Jinsha River landslide hazards by time-series InSAR with combined ascending and descending orbit data[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(11): 1135-1145. (in Chinese with English abstract)

[24] 杨沛璋, 崔圣华, 裴向军, 等. 基于 SBAS-InSAR 和光学遥感影像的大型倾倒变形体变形演化 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(6): 63-75.
YANG P Z, CUI S H, PEI X J, et al. Deformation and evolution of large dumping bodies based on SBAS-InSAR and optical remote sensing images[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(6): 63-75. (in Chinese with English abstract)

[25] 刘涛, 张明, 王立朝, 等. 甘肃舟曲江顶崖古滑坡形成演化机理与堆积体稳定性评价 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(3): 266-278.
LIU T, ZHANG M, WANG L C, et al. Formation and evolution

mechanism of the ancient landslide and stability evaluation of the accumulation body in Jiangdingya, Zhouqu County, Guansu Province[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(3): 266-278. (in Chinese with English abstract)

[26] 张凯翔, 张占荣, 于宪煜. SBAS-InSAR 和 PS-InSAR 技术在鲁西南某线性工程沿线地面沉降成因分析中的应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(4): 65-76.
ZHANG K X, ZHANG Z R, YU X Y. Application of SBAS-InSAR and PS-InSAR technologies in analysis of landslide subsidence along a linear infrastructure in southwestern Shandong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(4): 65-76. (in Chinese with English abstract)

[27] YAO J M, YAO X, LIU X H. Landslide detection and mapping based on SBAS-InSAR and PS-InSAR: A case study in Gongjue County, Tibet, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4728.

[28] ZHANG J L, YANG R, QI Y, et al. A study on the monitoring of landslide deformation disasters in Wenxian County, Longnan City based on different time-series InSAR techniques[J]. Natural Hazards, 2024, 120(13): 11851-11875.

[29] 张富灵. 库水及降雨作用下滑移–弯曲型滑坡形成条件与演化机制研究: 以木鱼包滑坡为例 [D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2021.
ZHANG F L. Study on formation conditions and evolution mechanism of sliding bending landslide under reservoir water and rainfall: A case study of Muyubao landslide[D]. Yichang Hubei: China Three Gorges University, 2021. (in Chinese with English abstract)

[30] 魏瑞琦. 三峡库区木鱼包滑坡变形机理分析及稳定性预测评价 [D]. 湖北宜昌: 三峡大学, 2022.
WEI R Q. Analysis of deformation mechanism and stability prediction evaluation of Muyubao landslide in Three Gorges Reservoir area[D]. YichangHubei: China Three Gorges University, 2022. (in Chinese with English abstract)

[31] GABRIEL A K, GOLDSTEIN R M, ZEBKER H A. Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 1989, 94(B7): 9183-9191.

[32] USAI S, KLEES R. SAR interferometry on a very long time scale: A study of the interferometric characteristics of man-made features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(4): 2118-2123.

[33] HOOPER A, BEKAERT D, SPAANS K, et al. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation[J]. Tectonophysics, 2012, 514: 1-13.

[34] 姜兆英, 于胜文, 陶秋香. StaMPS-MTI 技术在地面沉降监测中的应用 [J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(2): 295-302.
JIANG Z Y, YU S W, TAO Q X. Application of StaMPS-MTI technology in monitoring ground subsidence[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(2): 295-302. (in Chinese with English abstract)

[35] 郑坤, 聂运菊, 罗跃, 等. StaMPS-MTI 技术在上海市地面沉降监测中的应用 [J]. 江西科学, 2019, 37(1): 108-111.
ZHENG K, NIE Y J, LUO Y, et al. Application of StaMPS-MTI in Shanghai land subsidence monitoring[J]. Jiangxi Science, 2019, 37(1): 108-111. (in Chinese with English abstract)

[36] 冯文凯, 易小宇, 孟睿, 等. 三峡库区木鱼包滑坡不同库水升降速率变形响应离心模型试验研究 [J]. 水利学报, 2021, 52(5): 578-588.
FENG W K, YI X Y, MENG R, et al. Study on deformation response of Muyubao landslide in Three Gorges region under different water fluctuation rates by centrifugal model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(5): 578-588. (in Chinese with English abstract)

[37] HUANG F M, CHEN J W, LIU W P, et al. Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold[J]. Geomorphology, 2022, 408: 108236.

[38] 赵玉, 陈丽霞, 梁梦姣. 基于 LSTM_TCN 模型的降雨型滑坡时间概率预测及气象预警建模 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 201-214.
ZHAO Y, CHEN L X, LIANG M J. Temporal probability prediction and meteorological early warning modeling of rainfall-induced landslide based on LSTM_TCN model[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 201-214. (in Chinese with English abstract)

[39] 王佳, 朱鸿鹄, 叶霄, 等. 考虑时滞效应的库区滑坡位移预测: 以新铺滑坡为例 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(5): 1609-1619.
WANG J, ZHU H H, YE X, et al. Prediction of reservoir landslide displacements considering time lag effect: A case study of the Xinpu landslide in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(5): 1609-1619. (in Chinese with English abstract)

[40] 邓茂林, 易庆林, 韩蓓, 等. 长江三峡库区木鱼包滑坡地表变形规律分析 [J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3145-3152.
DENG M L, YI Q L, HAN B, et al. Analysis of surface deformation law of Muyubao landslide in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3145-3152. (in Chinese with English abstract)

Summary for “基于时序 InSAR 技术的木鱼包滑坡时空变形特征分析”

Analysis of spatio-temporal deformation characteristics of the Muyubao landslide via time series InSAR technology

LIU Yiliang[a,b,c]，FAN Xifeng[a,b,c*]，SHEN Gaowei[a,b,c]，ZUO Qingjun[a,b,c]，TANG Xuan[a,b,c]，LI Yongyi[a,b,c]，ZHU Qian[a,b,c]

a. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education；b. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation；c. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China

First author，E-mail：lyl@ctgu.edu.cn

* Corresponding author， E-mail：1518226868@qq.com

Abstract： Since the impoundment of the Three Gorges Reservoir Area in 2003, the Muyubao landslide has continuously deformed, posing significant risks to Yangtze River navigation and the safety of people's lives and property in the reservoir area. [**Objective**] To more comprehensively and accurately analyze the surface deformation information of the landslide, [**Methods**] this study employs the Stanford method for persistent scatterers-multi-temporal InSAR (StaMPS-MTI) and small baseline subset InSAR (SBAS-InSAR) technology, combined with Sentinel-1 data, to invert the deformation information of the Muyubao landslide from 2017 to 2022. The deformation information is compared with GNSS monitoring data, and a regional analysis of the spatio-temporal deformation characteristics of the landslide is conducted by integrating the advantages of both technologies through a combination of point and surface measurements. [**Results**] The results confirm that the deformation information obtained by InSAR technology is reliable, and each time-series InSAR technology has its own strengths and limitations. Specifically, the deformation rate intervals are as follows: the eastern slope of the landslide (−30.6 to −46.2 mm/year) > the eastern side of the major slipping plane (−25.2 to −37.8 mm/year) > the western side of the major slipping plane (−21.5 to −31.5 mm/year). [**Conclusion**] Based on the InSAR deformation results and previous studies, the deformation mode of the Muyubao landslide can be summarized as follows: the landslide undergoes overall and local deformation influenced by rainfall and reservoir water levels. During high water level periods, buoyancy-induced weight loss causes overall deformation, with a critical water level threshold of approximately 168 m. Heavy rainfall infiltrates the rock mass, raising the groundwater level, which promotes overall deformation and triggers local deformation in shallow soil and fractured rock masses. During the reservoir water decline period, the landslide is influenced by both buoyancy-induced weight loss and hydrodynamic pressure, with buoyancy effects being dominant; the hydrodynamic pressure effect lags by about 36 days. During low water level and rising water periods, overall deformation ceases, and heavy rainfall primarily causes localized deformation. The results indicate that time-series InSAR technology can effectively identify and monitor landslides, providing technical support for geological disaster prevention and risk assessment.

Key words: Muyubao landslide； deformation monitoring； SBAS-InSAR； StaMPS-MTI； Three Gorges Reservoir area；reservoir water level；rainfall

Received：2024-08-28；Revised：2024-10-10；Accepted：2024-10-21

doi：10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240489