

黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨

张建国, 董亚维, 李晶晶, 左强

(黄河水利委员会 黄河上中游管理局, 陕西 西安 710021)

摘要: [目的] 探索研究科学成熟的淤地坝拦沙淤积监测方法, 为精确获取淤地坝拦沙量, 实现淤地坝安全运行和拦沙效益发挥提供实践支撑。[方法] 以黄土高原为研究区, 总结分析淤地坝拦沙淤积监测的重要性和存在问题, 并提出黄土高原地区淤地坝拦沙淤积遥感监测方法。[结果] 提出了基于遥感技术获取淤地坝拦沙淤积量的原理和关键影响因素; 对比分析了无人机正射测量、无人机倾斜摄影、无人机载LiDAR等遥感方法的精度、工作量和可行性及在淤地坝拦沙淤积监测中的不同应用场景。[结论] 相较传统人工调查方式, 遥感监测技术在淤地坝拦沙淤积监测中具有较大优势, 可满足不同的拦沙淤积监测需求, 是未来淤地坝拦沙淤积测量监测的重要发展方向。

关键词: 黄土高原; 淤地坝; 拦沙淤积; 遥感监测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0387-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 张建国, 董亚维, 李晶晶, 等. 黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中存在的问题及方法探讨[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 387-392. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.046; Zhang Jianguo, Dong Yawei, Li Jingjing, et al. Discussion on problem and methods of monitoring sediment deposition of warping dams in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 387-392.

Discussion on Problem and Methods of Monitoring Sediment Deposition of Warping Dams in Loess Plateau

Zhang Jianguo¹, Dong Yawei¹, Li Jingjing¹, Zuo Qiang¹

(Upper and Middle Yellow River Bureau, YRCC, Xi'an, Shaanxi 710021, China)

Abstract: [Objective] A scientific monitoring methods for sediment-retaining amount in check dams were studied in order to provide practical support for accurately obtaining the sediment-retaining amount, and to realize the safe operation of check dams and the benefits of silt retaining. [Methods] Taking the Loess Plateau as the study area, the monitoring importance and existing problems of sediment-retaining amount in check dams were summarized, and the remote sensing monitoring methods of silt retaining in dam siltation for the Loess Plateau were proposed. [Results] The mainly influencing factors of obtaining sediment retention and siltation amount of check dam using remote sensing technology were proposed. The accuracy and feasibility of unmanned aerial vehicle (UAV) orthophoto measurement, UAV tilt photography, UAV lidar, and other remote sensing methods were compared and analyzed, as well as different application scenarios in silt detention and siltation monitoring in check dams. [Conclusion] Remote sensing technology has great advantages in sediment-retaining amount monitoring in check dams compared with manual method, which can meet different needs for monitoring of silt trap and siltation. Remote sensing is an important development direction for measuring of sediment-retaining amount in check dams in the future.

Keywords: the Loess Plateau; warping dam; sediment-retaining amount; remote sensing monitoring

收稿日期: 2022-08-23

修回日期: 2022-10-19

资助项目: 水利部财政预算项目“全国水土流失动态监测”(126201340009180001)

第一作者: 张建国(1986—), 男(汉族), 山东省肥城市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持监测及生态恢复研究。Email: zhangjidezs@163.com。

通讯作者: 李晶晶(1987—), 女(汉族), 山西省垣曲县人, 工程师, 博士, 主要从事水土保持监测、区域水土保持规划研究。Email: lijingjing0525@126.com。

淤地坝是黄土高原地区人民群众在长期同水土流失斗争实践中创造的一种行之有效的水土保持工程措施,在解决入黄泥沙问题、确保黄河安澜方面发挥了重要作用。根据水利部2019年开展的黄土高原地区淤地坝专项调研评估结果,截至2019年11月,黄土高原地区共有淤地坝58 776座,其中大型坝5 905座、中型坝12 169座^[1]。因此,无论从功能还是数量上看,淤地坝对黄土高原地区水土流失治理和管理工作的都至关重要。拦沙淤地是淤地坝的主要功能之一,准确估算淤地坝拦截泥沙量是科学评估淤地坝减沙效益和安全运用的重要基础数据,对于流域淤地坝管理、水土流失治理和黄河水沙变化趋势研究起到指导与支撑作用。

1 黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测的重要性

(1) 科学评价淤地坝的减沙效益。淤地坝作为治理水土流失的关键措施之一,迫切需要人们全面认识淤地坝建设的实际效益,其中,淤地坝拦截泥沙量是衡量淤地坝减沙效益的重要指标。以往的淤地坝或坝系建设大都在建设完成后进行一次性验收或鉴定,很难全面评价其真实成效,尤其减沙效益需要长期的监测才可进行评价。通过建立科学、高效的淤地坝监测体系,利用现代信息技术、3S技术,快速获取淤地坝拦沙淤积量及所在区域小流域径流泥沙等信息,可为正确评价淤地坝建设的真实拦沙成效提供科学依据^[2-3]。

(2) 支撑水土流失综合治理规划的制定。黄土高原水土流失治理自20世纪80年代步入以小流域为单元的综合治理阶段^[4],并且将这一经验沿用至今。水沙情势、流域产沙模数一直是小流域综合治理规划的重要基础数据,对合理布局各类水土保持措施和控制流域土壤侵蚀的发生至关重要。淤地坝是记录小流域侵蚀产沙信息与历史过程的重要载体,通过淤地坝拦沙淤积监测可以摸清流域侵蚀产沙模数,作为流域综合治理规划设计的依据,同时,对已建水土流失治理工程也能够起到评价和指导作用^[5]。已有研究发现由于土壤侵蚀模数调查值较淤地坝设计值显著降低,造成淤地坝空坝率上升,使淤地坝长期保持负效应^[6]。目前,有关水土保持专家呼吁基于黄河水沙与黄河流域生态保护和高质量发展新形势,实时调整黄土高原水土流失治理格局^[7-8],因地制宜,精准布局适宜措施类型和规模。因此,基于淤地坝拦沙情况,正确和实时了解流域产沙情况,及时调整规划,对我们水土流失治理工作具有重要现实意义。

(3) 服务淤地坝安全运行管理工作。20世纪70

年代以来,随着全球气候变化和水土流失情势变化,黄土高原地区典型的淤地坝水毁事故发生十余次,对下游群众生命财产安全造成了巨大影响,淤地坝运行管理和洪水风险等问题已受到了社会各界和各级政府的高度关注。淤地坝的拦沙淤地和防洪减灾功能与有效拦沙库容密切相关,随着运行时间的延长,有效库容减小,淤地坝运行风险也会相应增加^[9-10]。近年来,水土保持学术界和各级水行政主管部门着力推进淤地坝溃坝风险分析和汛期安全风险预警模型的开发^[11]。马瑞等^[12]构建了甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评价模型,经分析水面/泥面距淤地坝高的距离、剩余淤积库容是影响淤地坝安全风险的最大权重评价指标。陈祖焯院士课题组通过“家谱法”算法以及坝系内部洪水演进程序等构建淤地坝系连溃风险分析模型,引入拦沙淤积量概念,研究发现淤地坝溃坝的临界雨量与自身淤积高程具有显著的负相关关系^[13-15]。因此,科学合理的拦沙淤积数据是确保黄土高原地区淤地坝安全运行和水土保持生态建设健康发展的必要基础。

(4) 推动淤地坝相关水土流失科学研究。过去几十年,由于黄土高原水土流失治理的紧迫性,人们更多关注淤地坝的建设、效益发挥和运行管理等,有关淤地坝拦沙减沙等基础理论研究还不够深入^[16-18]。随着“有条件的地方要大力建设旱作梯田、淤地坝等”新建设思路的提出及在黄河水沙锐减新形势的背景下,探索和研究淤地坝的相关理论机理显得尤为重要。目前,淤地坝相关科学研究方面,关注点主要集中在淤地坝对流域径流产沙和河道形态变化影响,泥沙淤积特征、减沙减蚀作用机理,以及量化流域泥沙来源中坡面泥沙和沟道泥沙指标,分析坡面侵蚀与沟道侵蚀间的相互联系和作用等方面^[18-19],科学合理的拦沙淤积量监测数据是探索这些科学问题的重要基础,也是客观把握黄河产沙情势的关键环节。

近年来虽然有关管理部门对黄土高原地区淤地坝拦沙淤积情况进行了几次普查,但是普查指标多集中在淤地坝数量、分布、功能、效益和累计拦沙量等方面。由于淤地坝在黄土高原呈散点状分布,开展大区域拦沙淤积调查工作量较大,且快速、准确获取拦沙淤积的监测方法还是一个难点,目前关于大区域淤地坝淤积过程和逐年淤积量的监测资料少之又少。因此,总结分析淤地坝拦沙淤积监测现状,探索研究拦沙淤积监测新技术新方法,对黄土高原地区淤地坝建设具有重要意义。为此,本文系统分析和梳理了黄土高原地区淤地坝拦沙淤积监测中的存在问题,并在此基础上,结合地理信息系统技术提出了新时期适合淤

地坝拦沙淤积的遥感监测方法,以期为黄土高原地区科学开展淤地坝拦沙淤积监测提供技术指导。

2 淤地坝拦沙淤积监测存在问题

2.1 拦沙淤积实测数据有限,不能满足科研和生产需要

自1990年代以来,淤地坝一直是水土保持研究的重要课题。历史上,黄土高原地区大规模的淤地坝调查主要有1989年陕北淤地坝调查、黄河上中游管理局组织实施的黄土高原地区水保措施调查(截至1999年),2011年全国水利普查骨干坝普查等,分别通过人工调查的方法获取了截止相应年份的淤地坝数量、分布和淤积情况等。此外,2015年延安市、2016年鄂尔多斯市、2012年和2016年宁夏回族自治区等也曾分别对境内相关市县进行了淤地坝调查,相关数据对分析淤地坝拦沙效益、区域土壤侵蚀、泥沙来源等起到关键支撑作用^[19-20]。但因黄土高原淤地坝数量众多,每次调查范围有限,且难以每年对其拦沙量进行调查,目前已获得的淤地坝拦沙量都是累计到调查年份的淤积量,关于淤地坝次降雨或逐年拦沙量的数据更是少之又少^[21]。在黄河水沙变化具有时段特征的情况下,分析次/逐年的拦沙量特征对建立小流域产沙模型和揭示环境变化的侵蚀泥沙响应尤为重要。因此,相对黄土高原众多淤地坝的规模和运行情况,现有调查成果的范围、内容、时效等远远不能满足科研与生产活动的需要。

2.2 监测方法不适于大面积推广且精度较低

目前淤地坝拦沙淤积量获取方法主要可分为两大类:①推算法。常见的方法主要有放射性核素¹³⁷Cs示踪技术^[22]、数学建模^[21]、泥沙淤积体概化模型^[23]、水文比拟法估算^[24]或典型淤地坝调查等^[25]。张信宝等^[26]利用放射性核素¹³⁷Cs示踪技术和黏粒含量变化,估算了黄土丘陵区云台山沟小流域淤地坝1960—1970年年均产沙模数为 $12\ 696\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,该技术能够获取暴雨场次的淤积量,但受地表环境中¹³⁷Cs元素沉降的影响,更适用于获取1963年以后新建坝的历史淤积数据^[22],同时¹³⁷Cs存在量计算时背景值的采样点的条件比较苛刻,对结果影响较大。在建模方法中,有研究通过基于BP神经网络建模方法,建立降雨资料和淤积信息的对应关系,进行拦沙淤积预测和模拟^[21];杨吉山等人^[27]通过引入坝控流域面积、平均侵蚀强度、拦沙率等因素建立了淤地坝逐年拦沙量计算公式,获取了清水河流域1971—2012年淤地坝的逐年拦沙量。这些方法多数基于某种理想的均一条件假设进行的推算分析,且需要有较

为详细的降雨、流域水文站实测泥沙资料等,计算结果与实际值有一定偏差,实际应用中受地域、基础资料等条件限制。②实测法。通过人工野外调查淤积剖面或淤积高度/高程、淤积面积等,计算分析拦沙淤积量。在科学研究中,应用较多的有利用坝库中泥沙的沉积旋迴层,区分每次侵蚀产沙事件的淤积厚度进而获得拦沙淤积量。该方法可以获取次侵蚀性降雨的产沙信息,结合降雨资料,可定量研究流域土壤侵蚀机理和坝地沉积物组成,但该方法要求采样者有较为丰富的经验,受主观性影响较大^[28]。在实际生产中,应用较为广泛的是坝高一库容曲线法,利用差分GPS技术或者全站仪实测淤积面实际高程,查找设计文件中的坝高一库容曲线确定淤积量^[29-30],在库容曲线缺失时,也可以利用坝控范围内的1:10 000地形图重构淤地坝库容曲线。此外也有人们通过布设监测标尺以获取当年的淤积厚度与淤积量,但无法获取历史数据。

有研究^[23]表明实测法相较于放射性核素、淤积体概化等推算法获取的拦沙淤积量更为可靠,魏艳红等^[31]利用差分GPS技术或者全站仪得到淤积高程,并结合大比例尺地形图获取拦沙淤积量,被认为是估算淤地坝泥沙淤积量较为准确成熟的方法,应用较多。但在大力推进生态文明建设的新形势下,淤地坝拦沙淤积量逐年减小,每年或次降雨淤积厚度可能为厘米级甚至毫米级,我们基于1:10 000地形图建立的库容曲线,高程精度仅为1 m,远不能满足监测需求。因此通过总结发现,目前方法获取的泥沙精度相对较低,且多用于科学研究和小流域尺度,在宏观尺度上展开调查通常耗费大量人力物力,效率较低,对宏观尺度的淤积调查支撑不足,不适宜大范围生产推广。

3 淤地坝拦沙淤积遥感监测

近年来,随着遥感和地理信息系统技术、计算机处理技术的快速发展,无人机航空遥感和航天遥感技术为解决淤地坝传统淤积监测方法精度低、效率低、大区域调查难以推广等问题提供了可能。从广义的角度讲,淤地坝拦沙淤积过程,是地表形变的一种,目前,矿区沉降、滑坡、大坝变形等地表形变监测采用的遥感技术主要有无人机倾斜摄影、无人机载LiDAR和INSAR技术等,通过监测高程变化进而分析地表变形的空间特征。因此,本文借鉴地表形变常用遥感监测方法,重点分析遥感技术在淤地坝拦沙淤积监测中应用的原理、关键影响因素,对比分析传统无人机正射测量、无人机倾斜摄影、无人机载LiDAR和卫星合成孔径雷达差分干涉(DInSAR)等测量方法的

监测精度、工作量和可行性等,针对淤地坝拦沙淤积不同监测需求,探索可复制可推广的遥感监测方法。

3.1 拦沙淤积遥感监测方法与关键影响因素

3.1.1 拦沙淤积遥感监测方法 淤地坝拦沙淤积量的获取主要基于淤地坝淤积区域内多期高精度数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)、DEM 等测量成果,通过 DOM 勾绘淤地坝淤积体范围,对淤积体范围内多期 DEM 数据进行叠加求差运算,生成淤积体数字高程变化模型,从而精确获取每座坝拦沙淤积量。因此,DOM 地面像元分辨率和 DEM 高程精度是影响拦沙量精度的主要指标。目前,根据无人机航摄技术,水平平面精度可达到厘米或毫米级,能够满足监测精度需求,因此,如何提高航测高程精度成为准确计算拦沙淤积的关键^[32]。

3.1.2 影响遥感监测的关键因素

(1) 植被、水域等地表要素。淤地坝通过拦截泥沙形成坝内淤积区,由于淤积区内地势相对平整,水肥条件优越,通常建成短期内即可恢复植物生长。通过遥感手段获取的第一手影像成果为数字地表模型(digital surface model, DSM),通常是包含植被、地表建筑物和移动物体等非地面数据的高程模型,需进行非地面数据剔除才可生成 DEM。目前,DSM 生成 DEM 一直是一个难点,尤其植被因素的剔除,传统方法是人工识别植被覆盖区域,然后从 DSM 的高程中减掉与植被类型无关的均匀植被高度偏差,但植被的高度不是完全均匀,这一过程既增加了工作量,又降低了 DSM 精度,对拦沙淤积量的计算影响较大;另外,在黄土高原地区淤地坝不宜长期蓄水但确有蓄水需求的地区^[33],在非汛期有蓄水情况,且新建成淤地坝中,低于放水建筑物的淤积区,即“死库容”会存在一定水量,由于水面掩盖淤积面而无法开展无人机监测。因此,如何排除植被、水域等影响是遥感监测需要考虑的关键因素。

(2) 精度要求较高,且重点关注相对精度。黄土高原地区降雨年际变化大,年内分布不均,多集中于汛期,且以暴雨形式为主,拦沙淤积多发生在少数的几场暴雨中,多数降雨不会产沙或少量产沙,因而淤地坝拦沙淤积厚度会波动在毫米至米之间^[34]。魏艳红等^[35]调查研究发现延河流域典型坝 2014—2016 年年淤积厚度在 0.2~2.5 cm 之间;另外,根据 2016 年鄂尔多斯地区淤地坝拦沙效益调查结果,现状淤地坝(建坝 10 a 内)年均淤积厚度为 14.36 cm,其中年均淤积厚度 20 cm 以内的淤地坝数量占到 74.97%,10 cm 以内的占到 49.93%。因此,综合考虑年均和最小淤积厚度,淤地坝拦沙淤积高程方向精度应达到

厘米级。目前,国家现行比例尺成图精度要求最高为 1:500,DOM 精度要求为 30 cm,高程 1 级精度平地为 20 cm,可见拦沙淤积监测要求的精度高于国家现行比例尺的最高精度要求。此外,在精度方面,大多数 DEM 评估都关注绝对垂直精度,将建模的高程与相对于已建立的垂直基准(地理参考)的真实高程相关联,但在淤地坝淤积厚度监测中,主要通过两期 DEM 的高程差获取,更多关注高程的相对精度,在实际监测工作中,可根据不同需求适量布设相控点。

(3) 满足“技术可行,经济合理”的总原则。目前,通过遥感手段开展淤地坝拦沙淤积监测尚处于技术探索阶段,相较于传统的人工监测手段,具有省时省力的优势,但同时成本、技术要求也较高。此外,不同遥感监测手段获取的数据类型、精度、经济成本等不同,因此,应根据淤积监测需求选择科学、合理的遥感监测手段,在技术上可行,经济上合理。

3.2 不同遥感监测方法对比分析

3.2.1 无人机正射测量 低空无人机正射测量是由飞行平台搭载相机对测区进行垂直摄影,通过单一垂直影像数据生成 DOM,DSM 等测绘产品,并制作数字高程模型 DEM,具有方便灵活、操作简单、作业成本低的优势。目前,无人机正射测量已在国民经济不同的领域广泛应用^[36],由于其能获取高分辨率的 DOM 光学影像,平面精度通常可达到厘米级,纹理信息丰富,因而应用主要集中在农业、林草业、电力、自然灾害、水利等地表活动监测。但在应用时,受测区地形条件、无人机飞行姿态、设备性能、控制点布设等因素影响,获取的 DEM 高程精度通常难以保证,结果差异较大^[37],且生成 DEM 成果时受植被干扰较大,高程精度偏低,优于 1:500 的 DEM 数据,最高的垂直精度为 0.1 m 左右。在外界控制条件相对理想的情况下,高程平均误差能达到 $\pm(0.05\sim 0.2)$ m^[38]。

3.2.2 无人机倾斜摄影测量 无人机倾斜摄影是通过在同一飞行平台上搭载多镜头相机,在飞行过程中从垂直、倾斜等多个角度同时采集影像,通过内业的几何校正、平差、多视影像匹配等处理获得具有地物全方位信息数据的技术,可同时获得 DOM,DSM 和实景三维建模数据等。相较传统无人机正射测量,倾斜摄影技术由于采集影像多角度、高重叠度,有更加丰富的侧面纹理信息,因而在真三维模型制作和高程精度提升方面凸显优势,且后期处理软件相对较为成熟,可兼容大型固定翼飞机、大中小型无人机、街景车、手持式数码相机等各种硬件采集的数据源,具有高性价比、高精度、高效率等优势,但同样在生成 DEM 成果时无法排除植被因素的影响。目前国内倾

斜摄影测量技术仍处于快速发展的推广阶段,初期主要应用在智慧城市、城市规划、国土资源等方面^[36],近年来逐渐在废弃矿山、土方量等有所应用,但淤地坝拦沙淤积测量中还未见报道。已有的研究表明在实际应用中倾斜摄影技术高程精度可达到 0.06 m 左右^[39]。有研究对比分析了传统正射模式与五镜头倾斜摄影测量在是否使用机载 PPK、地面控制点及其密集程度等不同模式下的高程精度发现,在严格统一的外部数据采集条件和参数基础上,倾斜摄影的高程精度相对传统的低空正射模式可提高 0.23%~97.83%,绝对定位精度能达到亚米级^[40]。

3.2.3 无人机电载 LiDAR 无人机电载 LiDAR 是将无人机与激光雷达技术的优势相结合形成无人机电载 LiDAR 系统,通过位置、距离、角度等观测数据实时获取对象表面点的高精度三维坐标数据,形成高密度点云数据,经过滤波和地面点插值形成 DSM 和 DEM,反映地表空间的变化。该技术已在矿区环境监测、大坝变形、城镇规划、事故调查、林业调查、国土资源调查等方面有所应用。它的优点是能穿透植被缝隙获取高密度地表点云数据,数据获取效率高,产品生产周期短,相对测绘型无人机精度更高,但无法同时获取 DOM 数据,难以表达目标表面的纹理信息,且技术费用相对昂贵,在大区域应用中存在局限;目前对点云的后处理过程基本是基于现有的商业软件,对于地形复杂获取的海量点云数据处理过程中,滤波方法和模型去噪等还不是很成熟,使得处理过程中 DEM 包含显著误差,耗时较大,限制了实际应用^[41]。根据《机载激光雷达数据获取技术规范(CH/T8024-2011)》在 1:500 比例尺丘陵区高程中误差为 0.4 m,但在实际应用中,随着无人机飞行稳定性、设备性能的提高,高程精度可达到 0.03 m 左右^[42]。张永庭等^[43]采用无人机电载 LiDAR 监测技术获取宁东煤炭基地马莲台煤矿采煤沉陷区点云数据,通过水准测量标志点和 GPS 自动监测数据的对比分析,点云数据平均误差分别为 0.044 3 和 0.043 4 m。汤伏全等^[44]人对对比分析不同激光点云的矿区沉陷建模方法,发现专业化数字高程模型插值及三角网渐进加密滤波算法的效果相对较优,获取的 DEM 高程误差标准差分别为 0.046 和 0.013 m。

3.2.4 卫星合成孔径雷达干涉(InSAR)测量 InSAR 技术是利用同一地区不同时相的 SAR 影像,通过差分干涉获取该地区地表形变信息的技术手段。该技术具有覆盖面广、垂向精度高、可回溯和实时动态监测地表变形的能力,在我国应用起步较晚,目前多应用于地面沉降、滑坡、坝体变形等原地表形变的监测,

精度可达到毫米级。应用效果取决于诸多因素,主要包括:SAR 影像空间分辨率、影像数量及时间采样频率、雷达波长、监测区地物特征等,受这些因素影响,在利用 SAR 影像进行干涉处理时,易产生失相干现象,如无法得到地表沉陷盆地内大梯度变形信息。一些学者采用偏移量追踪技术(offset tracing)虽然有助于解决上述问题,但所需的高分辨率 SAR 影像数据获取成本高,难以推广应用。黄土高原地区淤地坝大区域点状分布特征显著,由于 InSAR 技术的覆盖面广和可回溯性等淤地坝拦沙淤积监测中具有的较大优势,但目前由于淤积区原地表覆沙、植被生长等会引起空间失相干及 InSAR 自身成像条件受大气效应、时间失相关和空间失相关影响的苛刻性,在淤地坝拦沙淤积监测应用存在局限,尚未开展。随着 SAR 卫星及传感器的迭代更新及 InSAR 技术方法的不断发展,其在淤地坝拦沙淤积监测可能会实现并发挥突出作用,是未来发展较好的方向。

4 不同淤地坝遥感监测方法应用场景

通过以上分析可知,不同的遥感监测方法在成果形式、监测精度、工作量和经济成本等方面具有较大差异,基于目前淤地坝拦沙淤积监测的不同需求,提出每种监测手段适宜的应用场景。

(1) 无人机正射测量方式适宜大区域范围内精度要求较低的淤地坝拦沙淤积量普查,如新一轮全国水利普查、各省区阶段性典型淤地坝拦沙淤积普查等,该项工作由于调查区域面积大,且主要针对一定时期内累计拦沙淤积量,精度要求相对较低,可选择传统无人机正射测量,通过获取平均淤积高程,查库容曲线方法,或对比本底 DEM 数据获取拦沙淤积量。

(2) 无人机倾斜摄影技术方法适宜精度要求较高,重点关注年或次拦沙淤积量,监测成果要求更丰富的应用情形,如水行政主管部门开展的淤地坝安全运行管理、淤地坝重点工程拦沙淤积调查或数字孪生流域中淤地坝相关数据的数字化等。在这些工作中,无人机倾斜摄影可以对当前淤地坝和淤积区实现全角度的数据采集,不仅可以从宏观角度对淤积量进行分析,同时也可以从局部角度出发,掌握淤地坝运行,消除传统测绘技术下测绘结果的局限性,展示淤地坝三维真实场景。

(3) 无人机 LiDAR 相较无人机航空摄影测量精度更高,外业数据采集效率更高,且具有穿透植被的优势,但相对经济成本较高,适宜有更高精度要求,关注年或次拦沙淤积量,且植被生长较为茂盛地区的典型淤地坝拦沙淤积量。如淤地坝拦沙淤积暴雨应

急调查评估、植被茂盛区典型坝调查等。

(4) 在实际工作中,建议根据不同监测需求和条件,将淤地坝拦沙淤积遥感测量与传统方法,如断面测量、标尺等方法的结合,通过天空地一体化手段更好地发挥遥感监测的作用。

5 结论

探索淤地坝拦沙淤积监测高新技术是推动淤地坝监测的重要工作。相对传统淤地坝拦沙淤积监测手段,遥感测量技术具有高精度、高时效性、安全可控、机动灵活等优势,可满足不同精度和监测需求的淤地坝拦沙淤积监测,是未来淤地坝拦沙淤积测量应用技术的重要发展方向,对黄土高原淤地坝拦沙效益发挥和水土流失治理具有重要意义。随着水利信息化与遥感技术的发展,水保相关部门(机构)应在现代科学技术的支撑下,积极试行无人机遥感、航空遥感等新技术、新方法在黄土高原淤地坝拦沙淤积监测中的推广应用。笔者认为无人机正射测量方法可在精度要求较低的大区域范围淤地坝拦沙淤积普查中推广应用;无人机倾斜摄影技术方法适宜在精度要求较高、重点关注年或次拦沙淤积量、监测成果要求更丰富的拦沙淤积调查中推广应用;无人机 LiDAR 适宜有更高精度要求(高程精度优于 0.05 m),可开展年或次拦沙淤积量,且植被生长较为茂盛地区典型淤地坝拦沙淤积调查中推广应用。通过拦沙淤积不同遥感监测高新技术的大力推广可为黄河流域水沙关系提供更为准确的拦沙量数据,助力黄河流域生态保护和高质量发展。

[参 考 文 献]

- [1] 刘雅丽,王白春.黄土高原地区淤地坝建设战略思考[J].中国水土保持,2020(9):48-52.
- [2] 董亚维,李晶晶,任婧宇,等.关于黄土高原地区淤地坝水土保持监测的几点思考[J].中国水土保持,2021(4):62-65.
- [3] 喻权刚,马安利.黄土高原小流域淤地坝监测[J].水土保持通报,2015,35(1):118-123.
- [4] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
- [5] 许文龙.皇甫川流域侵蚀产沙特征及土地退化研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2019.
- [6] 刘立峰,杜芳艳,马宁,等.基于黄土丘陵沟壑区第 I 副区淤地坝淤积调查的土壤侵蚀模数计算[J].水土保持通报,2015,35(6):124-129.
- [7] 胡春宏,张晓明.黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J].水利水电技术,2020,51(1):1-11.
- [8] 高健翎,高燕,马红斌,等.黄土高原近 70 年水土流失治理特征研究[J].人民黄河,2019,41(11):65-69,84.
- [9] 钟少华.王茂沟流域淤地坝防洪风险评价与除险方法研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2020.
- [10] 杨瑞,李子龙,王丹,等.黄土高原小流域淤地坝系安全评价[J].延安大学学报(自然科学版),2018,37(1):41-45.
- [11] 李智广,王楠,王英顺,等.大中型淤地坝安全度汛“四预”模型的重点主题及其算据[J].中国水利,2022(9):30-33.
- [12] 马瑞,张富,周波,等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评价模型[J].水土保持通报,2021,41(4):139-144.
- [13] 周嘉伟.淤地坝系溃坝过程反演及风险分析[D].陕西 西安:西安理工大学,2020.
- [14] 祖强,陈祖煜,于沐,等.极端降雨条件下小流域淤地坝系溃坝风险分析[J].水土保持学报,2022,36(1):30-37.
- [15] Chen Zuyu, Huang Xieping, Yu Shu, et al. Risk analysis for clustered check dams due to heavy rainfall [J]. International Journal of Sediment Research, 2021, 36(2):291-305.
- [16] 曲婵,刘万青,刘春春,等.黄土高原淤地坝研究进展[J].水土保持通报,2016,36(6):339-342.
- [17] 张红武,刘广全,侯琳,等.创新完善淤地坝结构是根治黄河的必由之路[J].人民黄河,2022,44(9):17-23.
- [18] 党维勤,党恬敏,高璐媛,等.黄土高原淤地坝及其坝系试验研究进展[J].人民黄河,2020,42(9):141-145,160.
- [19] 刘晓燕,高云飞,马三保,等.黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J].水利学报,2018,49(2):145-155.
- [20] 刘晓燕,高云飞,王富贵.黄土高原仍有拦沙能力的淤地坝数量及分布[J].人民黄河,2017,39(4):1-5,10.
- [21] 管新建,李占斌,李勉,等.基于 BP 神经网络的淤地坝次降雨泥沙淤积预测[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(9):221-225.
- [22] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等.侵蚀泥沙研究的¹³⁷Cs 核示踪技术[J].水土保持研究,2007,14(2):152-154,157.
- [23] 朱旭东,张维江,李娟.好水川流域小型水库及淤地坝泥沙淤积量估算[J].水土保持通报,2012,32(4):196-199.
- [24] 孙和平.小型水库泥沙淤积成因分析及淤积量的初步估算[J].地下水,2005(3):221-222,224.
- [25] 韩向楠,谢世友,高云飞.近年无定河流域淤地坝拦沙作用研究[J].人民黄河,2018,40(11):5-8,37.
- [26] 张信宝,温仲明,冯明义,等.应用¹³⁷Cs 示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,26(3):405-410.
- [27] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域淤地坝拦沙量分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):122-127.
- [28] 张玮.利用近 40 年来坝地沉积旋回研究黄土丘陵区小流域侵蚀变化特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [29] 刘立峰,杜芳艳,马宁,等.基于黄土丘陵沟壑区第 I 副区淤地坝淤积调查的土壤侵蚀模数计算[J].水土保持通报,2015,35(6):124-129.

- [6] 李晶,闫星光,闫萧萧,等.基于 GEE 云平台的黄河流域植被覆盖度时空变化特征[J].煤炭学报,2021,46(5):1439-1450.
- [7] 贺振,贺俊平.近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J].农业机械学报,2017,48(2):179-185.
- [8] 孙高鹏,刘宪锋,王小红,等.2001—2020 年黄河流域植被覆盖变化及其影响因素[J].中国沙漠,2021,41(4):205-212.
- [9] 范彦淳.河南省黄河流域水土保持生态建设成效及做法[J].中国水土保持,2016(10):24-26.
- [10] 李苗苗,吴炳方,颜长珍,等.密云水库上游植被覆盖度的遥感估算[J].资源科学,2004,26(4):153-159.
- [11] 赵子娟,范蓓蕾,王玉庭,等.2000—2018 年西辽河流域植被覆盖度时空变化特征及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(12):75-88.
- [12] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [13] 夏兴生,朱秀芳,潘耀忠,等.农作物干旱灾害实时风险监测研究:以 2014 年河南干旱为例[J].自然灾害学报,2016,25(5):28-36.
- [14] 刘晓璐,周廷刚,温莉,等.基于 VSWI 和 SPI 的 2000—2016 年河南省干旱特征研究[J].干旱区地理,2018,41(5):984-991.
- [15] 中华人民共和国水利部. SL 665-2014 北方土石山区水土流失综合治理技术标准[S].北京:中国水利水电出版社,2014:1-27.
- [16] 陈绪钰,李明辉,王德伟,等.采煤诱发地质灾害发育特征与成因机制[J].煤炭技术,2016,35(2):137-139.
- [17] 金玉玲,耿丽艳,齐庆超.河南矿山环境恢复治理遥感调查与分析[J].矿产保护与利用,2021,41(4):23-27.
- [18] 王新闯,刘文锴,杨会军,等.河南省植被覆盖度及其景观格局时空变化[J].水土保持通报,2015,35(6):241-247.
- [19] 刘丽娜,魏杰,马云霞,等.基于时空变化的黄河流域河南段生态环境评价研究[J].环境科学与管理,2021,46(2):169-173.
- [20] 张静,杜加强,盛芝露,等.1982—2015 年黄河流域植被 NDVI 时空变化及影响因素分析[J].生态环境学报,2021,30(5):929-937.
- [21] 余玉洋.河南省植被 NDVI 时空变化及其驱动因子研究[D].河南 开封:河南大学,2018.
- [22] 颜明,贺莉,王随继,等.基于 NDVI 的 1982—2012 年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J].中国水土保持科学,2018,16(3):86-94.
- [23] 徐浩杰,杨太保,曾彪.黄河源区植被生长季 NDVI 时空特征及其对气候变化的响应[J].生态环境学报,2012,21(7):1205-1210.
- [24] 杨运航,文广超,谢洪波,等.柴达木盆地典型地貌单元归一化植被指数变化特征[J].水土保持通报,2020,40(4):133-139.

(上接第 392 页)

- [30] 李莉,史学建,杨吉山,等.次暴雨下小理河流域淤地坝拦沙能力分析[J].中国水土保持,2020(12):31-33,5.
- [31] 魏艳红,焦菊英.黄土丘陵沟壑区不同土地利用方式下小流域侵蚀产沙特征[J].水土保持学报,2021,35(3):96-103.
- [32] 张效锋.影响无人机航测高程精度因素的研究[J].现代测绘,2021,44(3):31-33.
- [33] 吕薛锋,王程.陕西黄土高原地区淤地坝蓄水问题探讨[J].陕西水利,2022(2):176-177.
- [34] 杨媛媛.黄河河口镇一潼关区间淤地坝拦沙作用及其拦沙贡献率研究[D].陕西 杨凌:西安理工大学,2021.
- [35] 魏艳红.延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响[D].北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.
- [36] 郭庆华,胡天宇,刘瑾,等.轻小型无人机遥感及其行业应用进展[J].地理科学进展,2021,40(9):1550-1569.
- [37] 王朝辉,吴昊,孟将.无人机倾斜摄影像控布点方案研究及精度分析[J].测绘通报,2021(5):102-105,110.
- [38] 吴坤鹏,刘时银,朱钰,等.基于无人机摄影测量的梅里雪山明永冰川末端表面高程动态监测[J].地理科学进展,2021,40(9):1581-1589.
- [39] 李哲.基于无人机倾斜摄影测量技术的废弃矿山测量[D].河北 唐山:华北理工大学,2020.
- [40] 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.
- [41] 曲佳.机载激光雷达点云数据精度分析与评价研究[D].陕西 西安:长安大学,2010.
- [42] 孙健,王君杰,王雁昕,等.无人机 LiDAR 技术在矿区大坝监测中的应用研究[J].矿山测量,2021,49(6):50-54.
- [43] 张永庭,徐友宁,梁伟,等.基于无人机电载 LiDAR 的采煤沉陷监测技术方法:以宁东煤矿基地马连台煤矿为例[J].地质通报,2018,37(12):2270-2277.
- [44] 汤伏全,芦家欣,韦书平,等.基于无人机 LiDAR 的榆神矿区采煤沉陷建模方法改进[J].煤炭学报,2020,45(7):2655-2666.