

三维激光扫描技术在淤地坝安全监测中的应用

张峰¹, 周波¹, 李锋², 赵怀礼³, 马涛¹, 王彦武¹, 陈爱华¹

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 甘肃 兰州 730021; 2. 徕卡测量系统贸易(北京)有限公司, 北京 100020; 3. 定西市安定区水土保持局, 甘肃 定西 743000)

摘要: [目的] 监测黄土高原丘陵地区淤地坝在运行中的缓慢和微小变化, 及时发现淤地坝的病险隐患, 为科学监测、评价陇中黄土丘陵沟壑区乃至西北黄土高原地区淤地坝安全运行提供依据。[方法] 通过 Nove MS 50 全站扫描仪对南湾骨干坝和别杜川骨干坝坝体沉降、水平移位及坝体表面侵蚀进行定期激光扫描, 利用等间隔的点云记录坝体和库岸不规则形态。[结果] 两期监测对比可以看出, 南湾骨干坝接近路面的部分有约 1 cm 的变化, 左侧库岸有明显的变化, 变化量约为 0.8 cm, 日后极有可能发生小规模坍塌。别杜川骨干坝整个堤坝在半年的时间内右侧部分约有 1~2 cm 的下降变化, 监测结果和管理部门常规监测变形结果一致。[结论] 将三维激光扫描技术应用于淤地坝变形监测, 可以及时、准确、全面、直观获取淤地坝坝体和库岸表面数据, 使得变形监测工作更加全面、便捷、可信。

关键词: 三维激光扫描; 淤地坝; 安全监测; 陇中黄土丘陵区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)05-0241-04

中图分类号: S157.1, P234.4

文献参数: 张峰, 周波, 李锋, 等. 三维激光扫描技术在淤地坝安全监测中的应用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 241-244. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.040; Zhang Feng, Zhou Bo, Li Feng, et al. Application of 3D laser scanning technology in safety monitoring of silt dams[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 241-244. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.040

Application of 3D Laser Scanning Technology in Safety Monitoring of Silt Dams

ZHANG Feng¹, ZHOU Bo¹, LI Feng², ZHAO Huaili³,
MA Tao¹, WANG Yanwu¹, CHEN Aihua¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Gansu Province, Lanzhou,

Gansu 730021, China; 2. Leica Geosystems Co., Ltd. in Beijing, Beijing 100020, China;

3. Soil and Water Conservation Bureau of An' ding District, Dingxi City, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: [Objective] To monitor the slow/slight change in the loess plateau hilly region in the operation of silt dam and to detect the risk of dam breach in time by 3D laser scanning technology, to provide the bases for scientific monitoring of the silt dam engineering and for safety evaluation in the Middle Gansu loess hilly and gully area, and for silt dams safety in Northwest Loess Plateau as well. [Methods] The settlement, horizontal displacement and surface erosion of Nanwan and Bieduchuan backbone dam were termly scanned by Nove MS 50. The dam and river irregular shape were recorded by equally spaced point cloud and the deformation of silt dam body was analyzed accordingly. [Results] The comparison of two-stage monitoring results showed that there were 1 cm around changes near the road surface in Nanwan backbone dam map, and an obvious change also was found on the left reservoir bank. The change was about 0.8 cm, which might potentially resulted to small-scale collapses. In half year duration, Bieduchuan backbone dam had an about 1~2 cm decline in the right part. Our monitoring results were consistent with the routine monitoring results from the management department. [Conclusion] The accurate, comprehensive, intuitive monitoring data of dam and bank surface obtained timely from 3D laser scanning technology can make the deformation monitoring work

收稿日期: 2017-03-24

修回日期: 2017-04-16

资助项目: 国家重点研究计划项目“黄土丘陵沟壑区坝系安全运行与资源高效利用技术”(2017YFC0504704); 甘肃省水利科研推广计划项目“黄土丘陵沟壑区淤地坝安全监测与评价技术研究”(2014-223-5)

第一作者: 张峰(1975—), 男(汉族), 学士, 正高级工程师。主要从事水土流失规律与水土保持监测技术研究。E-mail: zhangfeng_lz@163.com。

more comprehensive, convenient and credible.

Keywords: 3D laser scanning; check dam; safety monitoring; Middle Gansu loess hilly region

淤地坝是在中国黄土高原丘陵沟壑区产生和发展的,距今有 400 a 多的历史^[1]。淤地坝作为黄土高原丘陵地区一项防止水土流失,充分利用水沙资源,变害为利,变荒沟为良田的主要工程措施,是利用水土流失的自然过程,集大面积上的水、沙、肥在小块坝地上使用,从而获得高产稳产的农田。淤地坝可以迅速的拦截入河泥沙,减少河道淤积,调蓄水资源,还可以以坝代路,方便交通。根据调查统计,经过 50 a 多的建设,黄土高原地区现有淤地坝 11 万余座,淤成坝地 $3.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$,可拦蓄泥沙 $2.10 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ^[2]。截止 2012 年底,甘肃省累计建成各类淤地坝 586 座,其中骨干坝 551 座,中型坝 436 座,小型坝 586 座,这些淤地坝可控制水土流失面积 $4\,038 \text{ km}^2$,拦截泥沙 $2.50 \times 10^8 \text{ t}$,淤地 $6\,269 \text{ hm}^2$,修通乡村道路约 $2\,300 \text{ km}$ ^[3]。由于淤地坝设计洪水为 10~30 a,防洪能力低^[4],随着运行时间的增加及气候变化等影响,淤地坝存在着滞洪库容不足,加之坝体外坡侵蚀、漂浮物撞击、管涌、施工质量差、管护不到位等因素,导致淤地坝放水建筑物损毁、坝体裂缝等病险隐患,加之防汛道路不畅,物资匮乏,淤地坝防汛和安全运行压力很大。

传统水利大坝安全监测采用测绘仪器,通过大地测量方法,根据大坝设计文件,结合坝体型式、结构、地质、水文和运行情况等确定变形监测点,进行定期或不定期连续观测,获取坝体实体变形情况。近年来,采用三维激光扫描技术对水利大坝实行定期扫描,生成高精度三维点云数据,实现了近似复制测量对象的目标,对关键变形点精确监测,观测结果更客观真实。对大坝监测数据处理的理论主要有数学模型、空间位移统计模型和模糊数学分析法等^[5]。目前淤地坝安全监测主要依据库坝破坏痕迹来推测淤地坝水毁过程,还未能真正实施对淤地坝从建坝到水毁的动态监测^[4],不能有效地对病险淤地坝水毁进行预警,无法建立起完善的淤地坝水毁风险评估体系。

淤地坝安全监测是为了了解坝体运行状态及发展趋势,保证其安全运行的重要措施,也是检验设计成果、检查施工质量和认识坝体各种参量变化规律的有效手段,主要包括变形监测、泄水建筑物和溢洪道的损坏程度监测、控制坝体及坝区监测等。通过监测数据分析可以掌握淤地坝实际工作形态与各种环境影响因素之间的关系,了解观测变量的波动范围和正常变化规律,当异常情况或不利发展态势发生时可以及时察觉并采取相应的补救措施,从而防止坝体从量

变发展到质变破坏,避免重大事故的发生。三维激光扫描技术是全新测绘技术,它突破了传统单点测量方法的不足,具有获取数据速度快、成果精度高、非接触测量等诸多优势,已广泛的应用于变形监测、数字城市、自然灾害调查、GIS 级虚拟现实以及岩体结构面统计、交通事故现场模拟等领域^[6]。本研究拟利用三维立体扫描技术,对陇中黄土丘陵沟壑区定西称钩流域南湾和别杜川骨干坝坝坡变形进行定点定期扫描监测,以期科学监测、评价陇中黄土丘陵沟壑区乃至西北黄土高原地区淤地坝工程建设安全性能提供技术探索。

1 研究区概况

1.1 研究区自然概况

称钩流域位于甘肃省定西市安定区西北部,距离市区 45 km,属黄土丘陵沟壑区第 V 副区,系黄河流域祖厉河水系二级支流,流域总面积 118 km^2 。地理位置介于 $104^\circ 14' 15''$ — $104^\circ 28' 31'' \text{ E}$, $35^\circ 41' 7''$ — $35^\circ 35' 10'' \text{ N}$ 。流域内梁峁起伏,沟壑纵横,海拔 $1\,957 \sim 2\,273 \text{ m}$,相对高差 316 m。流域主沟道长 17.5 km,比降 1/230,由花园、李家坪、双乐、新胜 4 条支流汇聚而成。流域内大于 3 km^2 的支沟有 14 条,小于 3 km^2 的支毛沟有 24 条,沟壑密度 2.72 km/km^2 。地质构造为陇西旋卷构造体系内旋回褶皱的一部分,主要有泥岩、砂岩、砾岩、石灰岩、泥灰岩、黏土岩类等沉积岩,基岩上为第三系上新统临夏组的红砂岩系及第四纪黄土所覆盖,表岩多为黄土层覆盖,沟谷下部有红土出露。流域属中温带半干旱气候,多年平均气温 $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$, $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 积温 $2\,239 \text{ }^\circ\text{C}$,年日照时数 $2\,500 \text{ h}$,无霜期 141 d,降雨总量少,时空分布不均且利用率低。多年平均降水量 380 mm,多集中在 7—9 月,且多以暴雨形式出现。年蒸发量高达 $1\,500 \text{ mm}$ 以上。流域内土壤主要有黄绵土、黑垆土、潮土及灰钙土 4 大类,其中以黑垆土分布最为普遍,主要在沟谷阶地和阴坡耕地,黑垆土质地较轻,结构性好,有机质含量平均为 1.075% ,全氮 0.08% ,全磷 0.06% ,速效钾 125.7 mg/kg ,是良好的耕作土壤,约占总土地面积的 80% ;黄绵土主要分布在梁峁陡坡、沟谷边缘及称钩河耕地;红土分布在沟谷部分滑坡面及谷底;灰钙土在阳山陡坡呈带状分布;潮土只在沟谷下游台地有分布。流域内地形破碎,土质结构疏松,抗蚀性差,加之人类经济活动频繁,长期以来水土流失一直是制约当地经济发展的瓶颈因素。严重的水土流失,导致

了流域内土壤肥力降低,土地生产力下降,严重影响了当地的农业生产,致使生态环境恶化。

1.2 研究区坝系建设现状

全流域现有治沟骨干工程 20 座,其中 2004 年之前修建完成高家岔、寇家川、旧庄嘴、秦家岔、红土庄 5 座骨干坝,依据 2007 年 5 月《甘肃省水利厅、甘肃省发展和改革委员会以甘水发[2007]119 号》文件,流域新修建骨干坝 15 座、中型坝 22 座、小型坝 32 座,骨干坝总控制面积 88.15 km²,总库容 1.29×10⁷ m³;中型坝 22 座,总控制面积 26.87 km²,总库容 2.63×10⁶ m³;小型坝 32 座,总控制面积 21.39 km²,总库容 1.48×10⁶ m³。骨干坝与中、小型坝的结构比例为 1:1.1:1.6。

1.3 典型研究坝概况

1.3.1 南湾骨干坝 南湾骨干坝 2005 年 4 月 1 日开工,2007 年 5 月 4 日竣工。坝控流域面积 4.15 km²,工程设计等级为 V 等,建筑物级别为 V 级。按 20 年一遇洪水标准,洪量模数 3.69×10⁴ m³/km²,设计洪水总量 1.53×10⁵ m³,200 年一遇洪水标准校核,洪量模数 7.36×10⁴ m³/km²,校核洪水总量 3.05×10⁵ m³,侵蚀模数为 5 600 t/(km²·a)。设计淤积年限为 18 a,淤积总量 3.22×10⁵ m³,淤地面积 4.6 hm²。该工程枢纽由土坝和放水建筑物 2 大件组成,土坝为黄土均质土坝。最大坝高 25.5 m,相应高程 1 967.5 m,总库容 6.27×10⁵ m³,其中滞洪库容 3.05×10⁵ m³,滞洪坝高 5.8 m,相应高程 1 966.0 m,拦泥库容 3.22×10⁵ m³。拦泥坝高 18.2 m,相应高程 1 960.20 m。坝顶宽 4 m,坝顶长 61 m,迎水坡和背水坡坝坡均为三级坡,在高程 1 962,1 952 m 处设置马道,马道宽 1.5 m,迎水坡上部坡比、中部坡比、下部坡比均为 1:3.0,背水坡上部坡比、中部坡比、下部坡比均为 1:3.0。放水建筑物为涵、卧管形式,由卧管、消力池、涵管和尾水消力池组成。目前工程运行良好,库区存水量不大,主要供应周边牲畜生活和生产用水。

1.3.2 别杜川骨干坝 别杜川骨干坝 2005 年 4 月 28 日开工,2007 年 9 月 10 日竣工。坝控流域面积 6.0 km²,工程设计等级为 V 等,建筑物级别为 V 级。按 20 年一遇洪水标准,洪量模数 3.69×10⁵ m³/km²,设计洪水总量 2.21×10⁵ m³,200 年一遇洪水标准校核,洪量模数 7.36×10⁴ m³/km²,校核洪水总量 4.416×10⁵ m³,侵蚀模数为 5 600 t/(km²·a)。设计淤积年限为 18 a,淤积总量 4.65×10⁵ m³,淤地面积 7.50 hm²。该坝为黄土均质土坝,最大坝高 27 m,高程 1 963.00 m,总库容 9.068×10⁵ m³,其中滞洪

库容 4.416×10⁵ m³,滞洪坝高 5.5 m,高程 1 961.5 m,拦泥库容 4.652×10⁵ m³。拦泥坝高 18.5 m,高程 1 956.50 m,土坝最大坝高 27 m,坝顶宽 4 m,坝顶长 88.5 m,迎水坝坡和背水坝坡均为三级坡,在 1 946.00,1 956.00 m 处设置马道,马道宽 1.5 m,迎水坡、背水坡的上部、中部、下部坡比均为 1:3.0。放水建筑物为涵、卧管形式,由卧管、消力池、涵管和尾水渠组成。经现场调查,该骨干坝涵管和坝后尾水渠有损毁,迎水坡受道路来水冲刷,局部存在陷穴,目前空库运行。

2 研究方法

2.1 监测设备

HDS(high definition surveying)是一种先进的全自动高精度立体扫描技术。它是用三维激光扫描仪获取目标物表面各点的空间坐标,然后由获得的测量数据构造出目标物的三维模型的一种全自动测量技术。主要通过脉冲测距法测量被测点与观测站之间的距离 S,然后根据横向观测角 θ 和纵向观测角度 α ,通过公式计算得出任一扫测点的空间相对坐标^[6]。徕卡 Nove MS50 全站扫描仪采用 WFD 激光测距技术,测量精度高,免棱镜测量距离高达 2 000 m,测距速度提高一倍,扫描速度最高可达 1 000 点/s,扫描距离可达 1 000 m,100 m 处点位精度达到 0.8 mm。该仪器集成了高精度全站仪技术、高速 3D 扫描技术、高分辨率数字图像测量技术以及超站仪技术等多项先进的测量技术,具有快速性、采样率高、实时性、动态性、主动性、非接触性、全数字特征、自动化等优点。MS50 全站扫描仪在地形测量、土石方测量、变形监测、数字化建模等领域有突出应用^[7]。

2.2 监测方法

通过 Nove MS 50 全站扫描仪对南湾骨干坝和别杜川骨干坝坝体沉降、水平移位及坝体表面侵蚀进行定期激光扫描,通过等间隔的点云记录坝体和河道不规则形态,采集海量点云数据,利用徕卡 infinity cyclone 软件建立形态变化数据库,将保存的数据进行形态分析,分析结果以色谱及数据的格式呈现。通过后期的软件分析处理,旨在论证多周期三维激光扫描观测进行淤地坝坝体形变分析的可行性。

2.3 监测过程

2.3.1 现场监测 由于测试现场无已知控制点,也没有 RTK 等设备,通过自定义独立坐标系来完成测站的架设,且由于现场地势复杂,地质较松软,扫描范围较大,为了提高架站的效率及保证架站位置稳定性,现场通过后方交会的方式进行架站,现场监测总共

从 $A_0 - A_8$ 架设 8 站, HJ_{01} 及 HJ_{02} 作为后视点, 进行辅助设站。为了确保研究的客观时效, 本次研究从汛期开始, 第 1 期测试扫描在 (2015/06/17) 实施, 历时 2 d, 第 2 期测试扫描在 (2015/12/02) 实施, 历时 2 d。

2.3.2 内业数据处理 利用徕卡 infinity 软件导入各站数据, 考虑到扫描时行人、植被等采样盲区干扰, 通过设定偏差限制和迭代次数, 对原始点云空间数据进行滤波、去噪等预处理后, 将误差降低到最小, 为了确保模型更接近真实, 利用空间差值对数据进行修补, 对数据整合后生成格网及等高线, 并对各站数据依据设站时的空间绝对坐标实现自动拼接, 利用预处理所得的点云数据, 在 Geomagic Studio 软件中进行建模, 对点云数据进行封装处理, 用大量空间三角形面来逼近还原实体, 然后用填充孔命令将缺失数据补齐, 最后使用快速光顺来去除表面的不光顺处。

通过 infinity 软件的 contour 功能, 在 DEM 的基础上可自动生成等高线, 主次等高线的间隔可以自定义, 等高线的宽度及颜色均可自行设定。

3 结果与分析

通过徕卡 Infinity 软件导出点云通用 PTS 格式, 然后将导出的 pts 数据导入到 3D reshaper 软件中, 在 3D reshaper 中对数据进行裁剪处理后, 然后生成不规则三角形网络, 最后生成表面模型。南湾骨干坝第 2 周期扫描数据三维模型详见图 1。别杜川骨干坝第 2 周期扫描数据三维模型详见图 2。

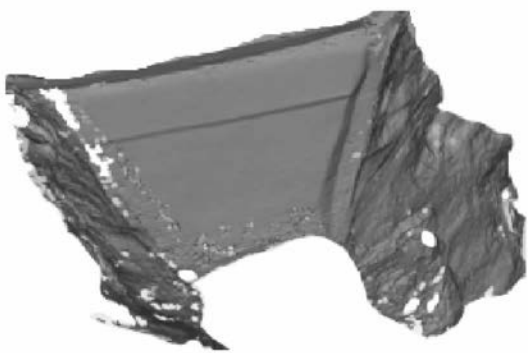


图 1 南湾坝第二周期扫描数据三维模型(20151202)

利用南湾骨干坝和别杜川骨干坝第 1, 2 期三维扫描模型对比, 进行表面监测分析, 来研究坝面的变化, 并设置合理的色谱带, 不断调试, 使得表现效果最佳, 可通过注记信息进行标记, 显示实际变化量及变化的方向。

南湾骨干坝经过第一、二期三维扫描模型对比分析, 坝坡种植苜蓿的区域大约有 60~70 cm 的一个变化, 而没有植被的部分变化不明显, 经过与现场实际

照片对比, 可以得知植被的生长对三维扫描监测的精度有显著影响。

将色谱带的变化范围进行调整, 调整至最大负值范围 -0.12 m, 南湾骨干坝接近路面的部分有约 1 cm 的变化, 左侧库岸有明显的变化, 变化量约为 0.8 cm, 日后可继续观察其变化, 如再发生变化, 极有可能会发生小规模坍塌。别杜川骨干坝坝坡及库岸变形监测经过第一、二期三维扫描模型的对比分析, 与前一期数据相比, 整个堤坝在半年的时间内, 右侧部分约有 1~2 cm 的下降变化, 监测结果和管理部门常规监测变形结果有一致性。

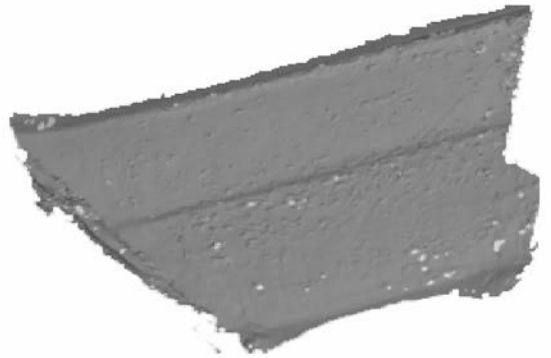


图 2 别杜川骨干坝第二周期坝面三维模型(20151203)

4 结论与讨论

淤地坝作为黄土高原丘陵地区主要工程措施, 多年来监测主要围绕淤地坝蓄水拦沙、生态、经济、社会效益目标进行, 多采用定点监测、调查统计和宏观分析等方法。

随着全球气候异常变化和淤地坝运行时间的增加, 淤地坝防汛和安全运行压力很大。但淤地坝在运行中的变化都是缓慢和微小的, 如果变化一旦明显异常, 往往已经对坝体安全构成严重威胁, 因此淤地坝安全监测及风险评估体系亟待完善。

本研究将三维激光扫描技术应用于淤地坝变形监测, 对数据采集、处理、建模、提取变形特征点等进行了研究尝试, 说明了利用三维激光扫描技术可及时、准确、全面、直观获取淤地坝坝体和库岸表面数据, 使得变形监测工作更全面、更便捷, 监测方法可行, 结果可信。但研究也发现由于三维激光扫描获取的数据量大, 信息量丰富冗杂, 因此数据的算法和模型构建及试验数据验证亟待完善。

下一步将在淤地坝坝体内埋设传感器等辅助方法, 配合渗透观测传感器等仪器设备, 使用高效率、高精度、非接触性的测量技术, 使淤地坝安全监测进一步向系统化、即时化、智能化、网络化方向发展。

(下转第 275 页)

值,提取植被信息的方法,计算区域植被覆盖率,并与最大似然分类法的参照结果相比较,结果得出利用VDVI得到植被覆盖率与实际最为接近。文中提出的植被覆盖率计算方法可有效提高测算效率,减少人为干预因素,用较小的成本获得较为准确可靠的结果,在水土保持设施验收方面有着广阔的应用前景。

本研究采用双峰直方图法和最大熵值法确定的阈值,在植被密度较低的区域植被信息提取结果不尽理想,若有可根据植被密度分布情况自动化确定阈值的方法,可大大提高植被覆盖率估算的准确度。

[参 考 文 献]

- [1] 夏玉慧,王江,辛静. 开发建设项目水土保持设施验收技术评估工作面临的问题及其对策[J]. 水土保持通报, 2015,35(3):149-151.
- [2] Alistair R, Fabio R, Salah S. Multi-class classification of vegetation in natural environments using an Unmanned Aerial system[C]// Robotics and Automation (ICRA), 2011 International Conference on IEEE, 2011: 2953-2959.
- [3] 李冰,刘镛源,刘素红,等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012,28(13): 160-165.
- [4] 雷添杰,李长春,何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011,20(1):178-183.
- [5] 杨超,苏正安,马菁,等. 基于无人机影像快速估算矿山排土场边坡土壤侵蚀速率的方法[J]. 水土保持通报, 2016,36(6):126-130.
- [6] 章文波,路炳军,石伟. 植被覆盖度的照相测量及其自动计算[J]. 水土保持通报, 2009,29(2):39-42.

- [7] 路炳军,刘洪鹤,符素华,等. 照相法结合数字图像技术计算植被覆盖度精度研究[J]. 水土保持通报, 2007,27(1):78-80,85.
- [8] 邓继忠,任高生,兰玉彬,等. 基于可见光波段的无人机超低空遥感图像处理[J]. 华南农业大学学报, 2016(1): 16-22.
- [9] 张正健,李爱农,边金虎,等. 基于无人机影像可见光植被指数的若尔盖草地上生物量估算研究[J]. 遥感技术与应用, 2016,31(1):51-62.
- [10] Verrelst J, Schaepman M E, Koetz B, et al. Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(5):2341-2353.
- [11] Mao Wenhua, Wang Yiming, Wang Yueqing. Real-time detection of between-row weeds using machine vision[C]// 2003 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2003.
- [12] 汪小钦,王苗苗,王绍强,等. 基于可见光波段无人机遥感的植被信息提取[J]. 农业工程学报, 2015,31(5): 152-159.
- [13] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979,8(2):127-150.
- [14] 梁华为. 直接从双峰直方图确定二值化阈值[J]. 模式识别与人工智能, 2002,15(2):253-256.
- [15] Kapur J N, Sahoo P K, Wong A K C. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985,29(3):273-285.
- [16] 胡健波,张璐,黄伟,等. 基于数码照片的草地植被覆盖度快速提取方法[J]. 草业科学, 2011,28(9):1661-1665.

(上接第 244 页)

[参 考 文 献]

- [1] 李婧. 淤地坝监测技术初探[J]. 水土保持通报:2003,23(5):50-52.
- [2] 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.
- [3] 姚进忠,雷升文,张军,等. 甘肃省淤地坝建设基本资料汇编[M]//甘肃省水利厅, 2013:283-284.
- [4] 李莉,王峰,孙维营,等. 黄土高原淤地坝水毁问题分析

[J]. 中国水土保持:2014(10):21-22.

- [5] 崔少英,包腾飞,裴尧尧,等. 基于模糊数学的大坝安全监测数据处理方法[J]. 水利水电能源科学, 2012,30(11):45-46.
- [6] 孔金玲,杨笑天,吴哲超,等. 基于三维激光扫描技术的高速公路滑坡体建模及应用[J]. 公路交通科技, 2015,132(12):12-13.
- [7] 丁点点. 三维激光扫描技术在滑坡变形监测中的应用[J]. 湖南城市学院学报:自然科学版, 2016,25(4):3-4.