

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.013.

高雅玉, 黄泉, 宋玉, 等. 黄土高原半干旱区淤地坝安全监测方法[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 59-66, 85.

Gao Yayu, Huang Xiao, Song Yu, et al. Safety Monitoring Method of Check Dams in Semi-arid Area of the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 59-66, 85.

黄土高原半干旱区淤地坝安全监测方法

高雅玉¹, 黄泉¹, 宋玉¹, 何文博¹, 华荣祥², 高金芳², 吕喜玺³

(1. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050;

2. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020; 3. 新加坡国立大学, 新加坡 119077)

摘要: [目的] 监测黄土高原半干旱区淤地坝在汛期后形变程度, 及时准确发现淤地坝的异常情况, 为黄土高原半干旱区淤地坝安全监测提供更加科学可靠的技术方法。[方法] 通过三维激光扫描仪对两座淤地坝进行扫描, 由此得到高密度、高精度、连续完整的 3D 点云数据, 然后将点云数据导入 HD Scene 软件进行点云预处理, 最后通过 Cloud Compare 以及 Geomagic Control 软件进行建模对比分析。[结果] 两期点云模型对比可以看出, 东沟淤地坝模型大量点云的偏移量在 0.05 cm 以下, 少量点云达到了最大偏移值 0.2 cm。西沟淤地坝模型大量点云的偏移量在 0.1 cm 以下, 极少量点云达到了最大偏移值 0.4 cm。汛期降水量占全年的 77.34%, 汛期后两座淤地坝均会产生较小的坝体沉降和水平位移, 但西沟淤地坝的形变受水压分量影响更为明显。[结论] 将三维激光扫描技术应用于黄土高原半干旱区淤地坝安全监测, 可以快速精准掌握淤地坝汛期后是否发生形变以及形变程度, 使得淤地坝安全监测工作更加精准可靠。

关键词: 淤地坝安全监测; 点云; 3D 偏差位移量; 坝体形变; 司家沟流域

中图分类号: S157.1; P234.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0059-08

Safety Monitoring Method of Check Dams in Semi-arid Area of the Loess Plateau

Gao Yayu¹, Huang Xiao¹, Song Yu¹, He Wenbo¹, Hua Rongxiang², Gao Jinfang², Lü Xixi³

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation of Ganst

Province, Lanzhou 730020, China; 3. National University of Singapore, Singapore 119077)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to monitor the deformation degree of check dam after flood season in semi-arid area of the Loess Plateau and find the abnormal condition of check dam timely and accurately, and to provide a more scientific and reliable technical method for the safety monitoring of check dams in the semi-arid region of the Loess Plateau. [Methods] The two check dams were scanned by a 3D laser scanner, and high-density, high-precision, continuous and complete 3D point cloud data were obtained. Then, the point cloud data were imported into HD Scene software for point cloud pre-processing, and finally, modeling and comparative analysis were performed by Cloud Compare and Geomagic Control software. [Results] The comparison of point cloud models between the two periods showed that the offset of a large number of point clouds in the Donggou check dam model was less than 0.05 cm, and a small number of point clouds reached the maximum offset of 0.2 cm. The offset of a large number of point clouds in the Xigou check dam model was less than 0.1 cm, and a very small number of point clouds reached the maximum offset of 0.4 cm. The precipitation in flood season accounted for 77.34% of the whole year. After flood season, both of the two check dams had small settlement and horizontal displacement, but the deformation

收稿日期: 2023-06-09

修回日期: 2023-09-20

资助项目: 甘肃省重点研发计划(22YF7FA165, 18YF1NA031); 高端外国专家引进计划(22JR10KA006); 甘肃省重点人才计划(甘组通字[2019]39号); 甘肃省水利科学试验研究及推广计划(甘水建管发[2024]78号、[2023]67号、[2022]59号)。

第一作者: 高雅玉(1985—), 女, 天津人, 博士, 正高级工程师, 主要从事水资源与水土保持研究。E-mail: gyy@lut.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

of Xigou check dam was more obviously affected by water pressure component. [Conclusion] The application of 3D laser scanning technology to the safety monitoring of check dams in semi-arid areas of the Loess Plateau can quickly and accurately know whether the deformation occurs after flood season and the degree of deformation, which makes the safety monitoring of check dams more accurate and reliable.

Keywords: safety monitoring of check dam; point cloud; 3D deviation displacement; dam body deformation; Sijiagou watershed

淤地坝是我国黄土高原半干旱区水土流失防治和生态环境建设的重要工程措施,其在减少入黄泥沙、淤地造田、防洪减灾、改善生态环境、促进经济发展等方面发挥着重要作用。但是随着淤地坝运行时间的推移及气候变化等影响,淤地坝达到设计运行年限导致滞洪库容不足,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,导致淤地坝发生放水建筑物损毁、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^[1]。因此加强淤地坝运行风险评价体系和安全监测系统的研究,成为新时期黄土高原半干旱区淤地坝建设和水土保持研究的迫切需求。近年来,国内外关于坝体安全监测越来越重视,例如 Suwatthikul 等^[2]介绍了坝体安全远程监测系统(DS-RMS)的发展和实际应用,DS-RMS 已应用在泰国的多座大型坝体上,工程应用表明 DS-RMS 使坝体安全监测和评估更加可靠。Martać 等^[3]介绍了一种基于 RFID、蓝牙和物联网技术的坝体安全管理与监测综合模型,该模型已应用于塞尔维亚共和国多瑙河上的大型坝体“铁门 1 号”中,工程应用表明在坝体监测过程中采用该模型可以减少人为的错误并改善监测过程。Seyed-Kolbadi 等^[4]通过伊朗戈勒斯坦省的 Boostan 土石坝的测量数据来评估其稳定性,研究结果表明该土石坝坝体状况正常。而我国坝体安全监测技术目前仍处于发展阶段,例如王培成等^[5]将 BIM 模型与监测数据相关联,开发了坝体安全监测信息管理系统,研究结果表明该方法实现了 BIM 模型与监测数据的交互。张芳等^[6]提出基于日变化速率的改进云模型识别方法,工程应用表明,该模型识别方法简单实用,能够准确识别监测数据中的突跳测值。余再康等^[7]以 B/S 模型为框架,结合了 WebGIS、GNSS 等技术,结果表明该系统不仅同时具备了库坝雨水情况监测与安全监测两大功能,还能利用现有数据及相关挖掘方法初步集成库坝工程信息识别与风险评估功能。

除上述技术方法外,三维激光扫描技术在坝体安全监测方面的应用也逐渐广泛。三维激光扫描技术是将实体的三维复杂信息通过激光的捕获和处理,形

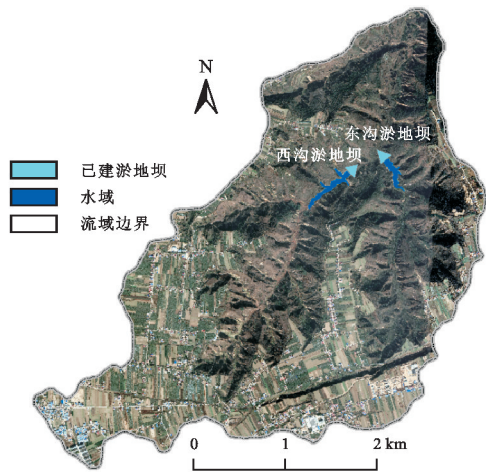
成带有属性信息的实体三维点云模型,即通过高速激光的扫描测量,获取目标的点、线、面、体数据信息^[8]。例如王举等^[9]以土石坝三维变形分析为主,提出了基于散乱点云粗糙度置信区间的多尺度坝体变形分析方法并验证了其精度。范泯进等^[10]采用三维激光扫描技术,以“全方位、无死角”的方式对坝体廊道各个部位、在各个时期的运行状态进行扫描;以“实景、高精度”的方式记录坝体廊道内可见和不可见信息;从而获取坝体高密度、高精度、连续完整的三维点云数据;结果表明该方法解决了监测设施“盲点”区域的变形监测问题。截至 2019 年 11 月,黄土高原地区淤地坝总共 58 776 座,其中已有 5 282 座淤地坝已认定为病险淤地坝,但是仍然没有完整统一的淤地坝安全监测风险评估体系对淤地坝形成从建坝到水毁的动态监测,从而防范病险淤地坝水毁造成的安全隐患。本研究选取甘肃庆阳司家沟流域的两座淤地坝为研究对象,拟利用三维激光扫描技术分别对两座淤地坝汛期前后进行两次定点和定期扫描监测,将得到的点云数据在 Geomagic Control 软件中进行点云建模,对比汛期前后的两个淤地坝模型,分析淤地坝坝体是否产生形变以及形变程度,以期能为我国黄土高原半干旱地区的淤地坝,特别是对于达到设计淤积年限却仍然在运行的淤地坝安全监测和维护提供技术探索。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

司家沟流域位于甘肃省庆阳市西峰区泾河上游,地理坐标位于东经 107°40′—107°43′,北纬 35°43′—35°46′(图 1),流域面积为 7.23 km²,由于深居内陆,海洋上空的水汽受到高山、高原的阻挡无法随着季风到达,故降水机率大减,基本属于大陆性气候,降水较少,雨水主要集中在 7—8 月,且多为暴雨,而春冬季多风且干燥,是中国典型的半干旱缺水地区。耕地以黑垆土为主,微碱性,土壤肥沃、疏松,垂直渗透力强。地表水资源贫乏,自然条件严酷,农业生产困难^[11]。流域内土地利用类型主要为耕地、林地、草地、水体和裸地 5 大类,其中草地占整个流域面积的绝大部分,占比高达 60%,流域内草地主要分布在坡地上;林地面积占比为 27.7%,

主要分布在沟谷和地势较低的坡面;裸地面积占比为 10.4%,主要分布在陡坡上;水体和耕地面积占比很少,分别为 0.7%,1.2%,水体主要是流域内 2 座淤地坝蓄水形成的,耕地主要是梯田和坡耕地^[12-13]。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2016)1600 号的标准地图制作,底图未做修改。

图 1 司家沟流域地理位置
Fig. 1 Geographical location map of Sijiagou Basin
流域境内现有两座已建的淤地坝,分别为东沟淤

地坝和西沟淤地坝,两坝都是在 1996 年 11 月建成。表 1 为两座淤地坝的各项设计参数。东沟淤地坝目前淤泥面距坝顶的高度为 13.6 m,已淤积 13.20 万 m³,虽已经超过设计淤积年限但仍未淤满,防汛道路不畅通,坝体维护较好,但是没有溢洪道等泄洪设施,仅有放水卧管;西沟淤地坝目前淤泥面距坝顶的高度为 11.60 m,已淤积 18.70 万 m³,虽已经超过设计淤积年限但仍未淤满,防汛道路不畅通,坝体维护较好,水土资源没有得到开发利用,由于没有溢洪道等泄洪设施,只有放水卧管,因此为了汛期防洪安全,基本属于空库运行状态^[14]。

图 2 为 1994—2021 年西峰区年降雨量变化,从图中我们可以看出,西峰区近 28 年降雨随时间的变化规律为丰水年与枯水年不断交替,但总体上呈上升趋势,说明淤地坝的建设正在逐渐改善该地区生态环境;2018 年年降雨量为 717.8 mm,相较于多年平均降雨量的 553.8 mm,高出了 29.61%,为丰水年;并且两座淤地坝已运行 22 a,均已经远超过了淤地坝的设计淤积年限。因此本次研究采用 2018 年对两座淤地坝进行坝体扫描所保留的点云数据进行安全监测变形分析很具有代表性。

表 1 司家沟流域东沟和西沟淤地坝设计参数

Table 1 Design parameters of Donggou and Xigou check dams in Sijiagou Basin

类别	设计淤积 年限/a	设计总库容/ 万 m ³	坝高/m	坝控面积/ km ²	设计拦泥库容/ 万 m ³	蓄水量/ 万 m ³
东沟淤地坝	16	50.20	22.3	3.11	22.20	11.60
西沟淤地坝	10	81.00	21.3	4.09	29.00	12.40

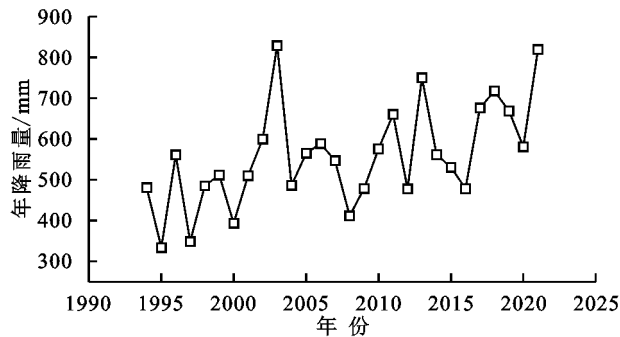


图 2 1994—2021 年西峰区年降雨量变化
Fig. 2 Changes of annual rainfall in Xifeng District from 1994 to 2021

1.2 数据采集及处理

淤地坝安全监测是指通过各种监测设备对淤地坝实际运行状态进行评估,了解淤地坝在各种环境因素影响下所导致的变形及变形程度,并且在出现病险情况后及时采取补救措施,从而防止造成重大安全事故。进行淤地坝安全监测可分为点云数据采集、处理、建模与分析 3 部分。点云数据采集是指通过三维激光扫描仪对淤地坝进行坝体扫描得到淤地坝完整、

连续的点云数据;点云数据处理是指对采集到的点云数据进行点云滤波、点云降噪和数据自动拼接等工作,提高数据的准确性,为后续的点云建模与分析的准确性提供保障;点云建模与分析是指通过 Geomagic Control 等各种软件进行建模,对比分析淤地坝在汛期后是否发生形变以及形变程度。其主要安全监测流程如图 3 所示。

1.2.1 坝体扫描 坝体监测通常涉及环境变量(如水位和温度)和影响变量(变形、开裂、渗流等),相关的监测数据可以反映这些变量随时间的变化趋势,是管理人员了解坝体运行状态的重要信息^[15]。本次研究于 2018 年汛期前后对两座淤地坝进行坝体扫描,观测淤地坝周围的地形地貌,采用 CGCS-2000 地理坐标系作为参考坐标系,挑选地基结构稳定、视野开阔的地方为三维激光扫描仪布设多个统一参考不动的临时控制点,并记录每个临时控制点的地理位置,确保两次坝体扫描的定位控制基础相同;利用地面三维激光扫描仪通过精确扫描获取坝体完整的点云坐标和高程数据,最终完成对淤地坝坝体及坝体周围全

面的控制测量。司家沟流域的东沟和西沟淤地坝均位于黄土高原,由于黄土高原独特的地理面貌,每个扫描站点都会受到坝体周围环境的影响。本次研究所使用的三维激光扫描仪激光发射频率设置为 600 kHz,实际测量距离为 600 m。为保障数据的可靠性,在单个站点 300 m 处测量点密度为 0.2 m/m^2 ,每两个站点之间的距离控制在 50~60 m,这样才能够获取黄土高原复杂外界条件下真实有效的点云数据。并且使用专业单反数码相机对坝体及其周边环境进行摄影,使获取的彩色点云影像与坝体实际情况基本吻合。在整个坝体扫描完成后,检查点云数据的精确率、重复率以及完整性,避免在后续数据处理中出现大量的点云数据模糊、重复和不完整等情况。

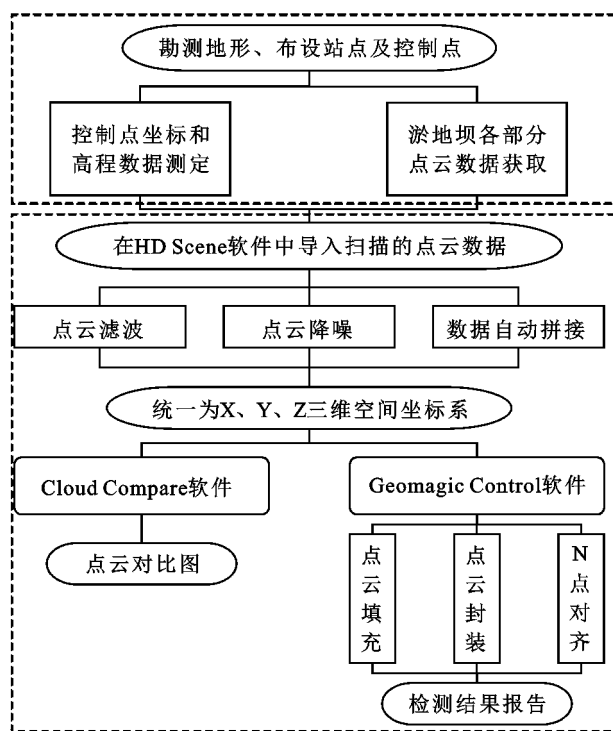


图 3 淤地坝安全监测流程

Fig. 3 Flow chart of safety monitoring of check dam

1.2.2 点云预处理 由于淤地坝的周围环境比较复杂,扫描过程中受行人、碎石、植被和建筑物等外在因素干扰,在 HD Scene 软件中首先对原始的点云数据进行精度验证、密度检查、空洞检查等,检查数据的完整性及覆盖范围,确保每个测站的点云数据完整覆盖坝体及坝体周围。接着进行点云滤波、点云降噪等处理,将不需要的点云数据剔除;该过程处理得越精准,为后续建模分析提供的数据质量越好,在下一步数据处理过程中相应的工作量也会越小,所以点云过滤、点云降噪是整个数据处理中最为重要的环节之一^[16]。同时为了保证模型更加贴近现实,使用空间差来修复数据,在对数据进行整合之后,生成网格和等高线,并且根据设站时的空间绝对坐标,对每一个

站的数据进行自动拼接。点云数据坐标系最后统一导出为 X,Y,Z 三维空间坐标系。

1.2.3 点云对比 CC(cloud compare)是开源的点云数据处理的类库,提供了点云数据基本处理算法(如海量点云数据的组织与管理、点云滤波、构建三角网等通用算法),有助于提高源程序的开发效率^[17]。将上述预处理的点云数据导入到 CC 中,可生成两个淤地坝汛期前后点云 RGB 色彩模式图;如图 4—5 所示,图中的点云模型颜色是通过红(R)、绿(G)、蓝(B)三原色颜色通道的变化以及它们相互叠加得到的。

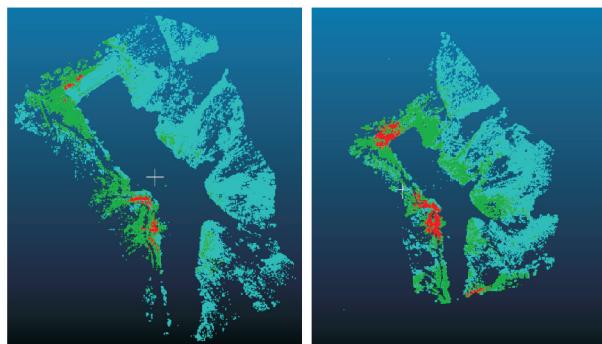


图 4 东沟淤地坝汛期前后点云 RGB 色彩模式对比

Fig. 4 Comparison of RGB color patterns of point clouds before and after flood season in Donggou check dam

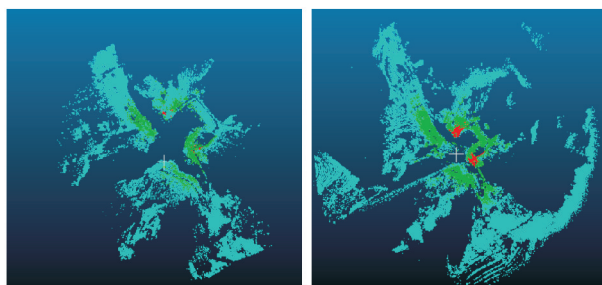


图 5 西沟淤地坝汛期前后点云 RGB 色彩模式对比

Fig. 5 Comparison of RGB color patterns of point clouds before and after flood season of Xigou check dam

1.2.4 点云建模 Geomagic Control 软件是一种全面的检测自动化软件,应用于三维扫描仪和其他便携式检测设备的测量流程。通过软件平台,可在检测对象上进行编辑、CAD 比较、几何尺寸和公差等自动化操作对数字参考模型和实际制造工件进行快速、准确和图形化的对比,多应用于样件检测、生产检测和供应商质量管理。将 HD scene 软件中预处理的点云数据在 Geomagic Control 软件中进行建模,对点云数据进行封装处理操作,利用填充功能,将大量的空间不规则图形分别填充到模型的单个孔,然后进行对齐处理,选择 N 点对齐操作后,最终将两个淤地坝两期的点云模型进行 3D 比较,生成 Geomagic Control 对比检测结果报告。

1.2.5 分析方法 将 Geomagic Control 对比检测结

果绘制成东沟和西沟淤地坝点云偏差分布表(表 2),以汛期前的淤地坝为参考模型,汛期后的淤地坝为变化模型,将汛期前后的点云数据空间叠加,进行对比分析。坝体形变是淤地坝安全状况的直观体现,蕴含了坝体变形性态的动态特征,也是水位、温度、时效等因素综合作用的结果^[18];通常情况下坝体的形变分为两类,一类是由坝体的自身重力造成的垂直沉降,另一类是由上游水压造成的垂直于坝体轴线的水平形变^[19]。本文以 3D 偏差位移量来衡量淤地坝的形变,3D 偏差位移量是指在 X,Y,Z 三维空间坐标系中,以汛期前的空间点云位置为参考点,汛期后的空间点云位置与之相比较发生空间位置改变的距离量,偏差位移量为“+”只表示垂直于淤地坝轴线的水平形变量,此形变量发生在 XOY 二维平面坐标系中,“+”表示向 X,Y 轴正方向的偏移量;偏差位移量为“-”表示垂直于淤地坝轴线的水平形变量和垂直沉降量,垂直沉降量发生在三维空间坐标系的 Z 轴,由于垂直沉降量方向为 Z 轴负方向,所以“-”表示向 X,Y 轴负方向的偏移量和向 Z 轴负方向的偏移量;偏差分析精度达到了 0.001 mm,可以精确地分析淤地坝的形变量,进而分析淤地坝点云模型的整体 3D 偏差位移量。

表 2 东沟和西沟淤地坝点云偏差分布
Table 2 Point cloud deviation distribution of
Donggou and Xigou check dams

东沟淤地坝		西沟淤地坝	
偏差区间分布/cm	点云数量/个	偏差区间分布/cm	点云数量/个
-0.1960~-0.1650	6589	-0.3959~-0.3332	153
-0.1650~-0.1339	8308	-0.3332~-0.2705	213
-0.1339~-0.1029	7843	-0.2705~-0.2078	2209
-0.1029~-0.0719	9601	-0.2078~-0.1452	25957
-0.0719~-0.0408	14166	-0.1452~-0.0825	38980
-0.0408~-0.0098	32860	-0.0825~-0.0198	69909
-0.0098~0.0098	137522	-0.0198~0.0198	234865
0.0098~0.0408	36918	0.0198~0.0825	88327
0.0408~0.0719	16476	0.0825~0.1452	26327
0.0719~0.1029	12682	0.1452~0.2078	13986
0.1029~0.1339	10052	0.2078~0.2705	5117
0.1339~0.1650	8702	0.2705~0.3332	531
0.1650~0.1960	6955	0.3332~0.3959	276

2 结果分析与讨论

2.1 东沟淤地坝点云模型分析

由表 2 可知东沟淤地坝点云模型发生位置偏移的点云数量为 308 673。最大 3D 偏差位移量为 0.196 0 cm,在可计算的范围内,最小 3D 偏差位移量

为 0.009 8 cm,经 Geomagic Control 对比检测报告计算的平均“+”偏差位移量为 0.042 6 cm,平均“-”偏差位移量为 0.040 1 cm。其中-0.040 8~-0.009 8,-0.009 8~0.009 8,0.009 8~0.040 8 三个偏差区间分布的点云数量占比较大,其余偏差区间分布占比较小。大多数点云偏差位移量集中在-0.05~0.05 cm 区间内,占比达到了 67.16%,说明大部分点云的偏移量在 0.05 cm 以下,而只有较少部分的点云偏移量达到了近似 0.2 cm,但是淤地坝整体形变均在可控范围内,坝体处于稳定状态,无滑坡、放水卧管损坏等病险老旧现象。这一现象表明:东沟淤地坝前期施工设计和后期维护工作非常合理,使得淤地坝虽然已经远超过了设计运行年限,但仍然可以正常使用。

2.2 西沟淤地坝点云模型分析

由表 2 可知,西沟淤地坝点云模型发生位置偏移的点云数量为 506 850 个。最大 3D 偏差位移量为 0.395 9 cm,在可计算的范围内,最小 3D 偏差位移量 0.019 8 cm,经 Geomagic Control 对比检测报告计算的平均“+”偏差位移量为 0.050 7 cm,平均“-”偏差位移量为 0.048 9 cm;经计算,其中-0.395 9~-0.333 2,-0.333 2~-0.270 5,-0.270 5~-0.145 2,0.333 2~0.395 9,0.270 5~0.333 2 这 5 个偏差区间分布的点云数量总占比不到 1%,而-0.082 5~-0.019 8,-0.019 8~0.019 8,0.019 8~0.082 5 三个偏差区间分布的点云数量占比高达 77.56%。从整体上看,大多数点云偏差位移量集中在偏移距离-0.1~0.1 cm 区间内,点云数量占比达到了 77.56%,说明大部分点云的偏移量在 0.1 cm 以下,虽然也有点云偏移量达到了近似 0.4 cm,但其占比极少。西沟淤地坝最大 3D 偏差位移虽然是东沟淤地坝的 2.02 倍,但其整体形变仍不明显,后续可继续观测,防患于未然。

2.3 降水量分析

坝体安全和潜在故障是水资源管理中风险最高的问题之一^[20]。决定坝体形变的 3 个主要因素为:水压分量、温度分量、时效分量。其中水压分量为上游水位压力造成的坝体形变;温度分量是由于坝体混凝土变温引起的形变;时效分量是坝体在建成之后,基岩沉降并达到稳定状态的过程中产生的形变^[21]。由于本次研究对象为位于甘肃省庆阳市西峰区司家沟流域的两座淤地坝且两次监测时间为一年的汛期前后,所以温度和时间对本次研究的淤地坝坝体形变影响很小,因此本次研究主要分析水压对淤地坝坝体形变造成的影响。

结合图 6,分析 2018 年西峰区内年降水量变化可知:该地区年降水量主要集中在 4—9 月,占到全年

的 89.63%，最大月降水量发生在 7 月，占到全年的 34.56%，最小月降水量发生在 12 月，仅占全年总降雨量的 0.24%，汛期（6—9 月）总降水量为 555.2 mm，占到全年总降雨量的 77.34%。

如图 7 所示，以 7 月份月降水量为分界点。从 1 月份到 7 月份，月降水量总体呈上升趋势，但 1—2 月份以及 4—5 月份月降水量在减少，且 2 月份几乎没有降水；从总体上看，1—5 月份月降水量变幅不大，基本处于降水量较少的稳定状态；在此期间库水位接近正常蓄水位运行，库水位变幅较小，因此淤地坝坝体所受水压力较小，几乎没有发生任何坝体形变。从 5—7 月份月降水量上升了 212.1 mm，上升幅度为 589.17%。在此期间库水位涨幅较大，已超过了正常

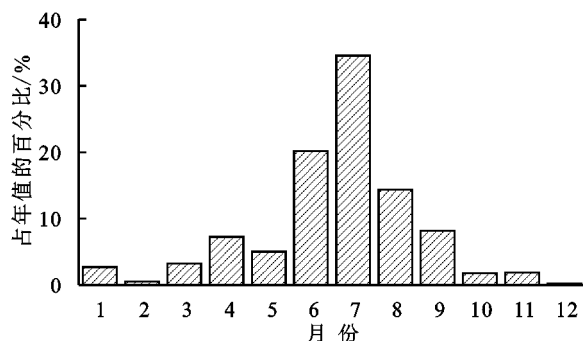


图 6 2018 年西峰区每月降水量占年值的百分比

Fig. 6 Percentage of monthly precipitation to annual value in Xifeng District in 2018

2.4 对比分析

对比东沟和西沟淤地坝点云模型的整体 3D 偏差位移情况，绘制东沟和西沟淤地坝点云偏差位移对比表（表 3）。由表 3 可知，西沟淤地坝点云模型发生位置偏移的点云数量多于东沟淤地坝。除此之外，在最大 3D 偏差位移量、最小 3D 偏差位移量、平均“+”偏差位移量和平均“-”偏差位移量方面，西沟淤地坝都是大于东沟淤地坝的。在汛期过后东沟和西沟淤地坝均产生不同程度的坝体沉降和水平位移，但西沟淤地坝的平均“+”偏差位移是东沟淤地坝的 1.19 倍，平均“-”偏差位移是东沟淤地坝的 1.22 倍，说明水压分量对东沟和西沟淤地坝坝体形变有较大的影响，并且对西沟淤地坝坝体形变影响更为明显。

2.5 讨论

淤地坝作为黄土高原半干旱区水土流失防治的主要工程措施，其在减轻沟道侵蚀、拦截入黄泥沙、蓄洪滞洪、减蚀固沟、淤地造田、改善农村生产条件和促进退耕还林等方面发挥了显著的生态、社会和经济效益^[22-23]。但相较土石坝，淤地坝的防洪标准不高，更容易发生溃坝^[24]；并且随着淤地坝运行时间的推移，

蓄水位，库水位对淤地坝坝体及坝体周围产生一定的压强导致坝体形变，此时的形变量达到最大值。从 7—12 月份，月降水量总体呈下降趋势，7—10 月份月降水量下降幅度较大，在此期间库水位降幅较大，库水位对淤地坝坝体及坝体周围产生的压强逐渐减小，使得原来产生形变的坝体逐渐恢复。10—12 月份月降水量变幅不大，基本处于降水量较少的稳定状态，库水位接近正常蓄水位运行，此时水压力很小，淤地坝坝体几乎不再产生形变。由此可得淤地坝的形变时间发生在汛期，汛期的降水量占全年的 77.34%；发生形变的主要原因是库水位对淤地坝坝体及坝体周围产生一定的压强导致坝体形变，在非汛期期间淤地坝坝体几乎不会产生任何形变。

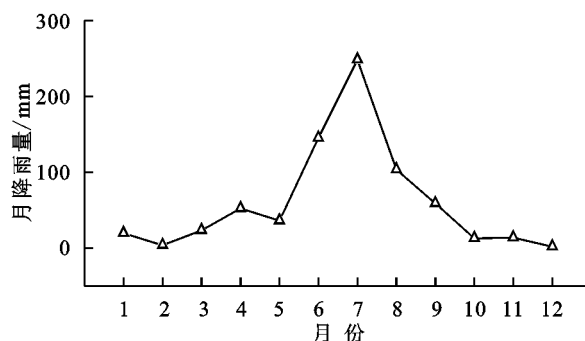


图 7 2018 年西峰区月降水量变化

Fig. 7 Changes of monthly precipitation in Xifeng District in 2018

淤地坝越接近设计淤积年限，淤积库容越小，淤地坝运行风险也就越大，若再遇到突发性强降雨，淤地坝可能发生垮坝事件，甚至造成串坝溃决等严重后果^[25]。但是截至目前，黄土高原半干旱区尚未形成完善统一的淤地坝安全监测系统，因此构建黄土高原半干旱区淤地坝系运行风险评价体系和加强淤地坝安全监测已迫在眉睫。

表 3 东沟和西沟淤地坝点云偏差位移对比表

Table 3 Comparison table of point cloud deviation and displacement of Donggou and Xigou check dams

指标	司家沟东 沟淤地坝	司家沟西 沟淤地坝
发生位置偏移的点云数量/个	308673	506850
最大 3D 偏差位移量/cm	0.1960	0.3959
最小 3D 偏差位移量/cm	0.0098	0.0198
平均“+”偏差位移量/cm	0.0426	0.0507
平均“-”偏差位移量/cm	0.0401	0.0489

淤地坝安全监测是通过各种监测设备收集淤地坝运行数据进行整理分析，了解淤地坝运行状态，确保其安全稳定运行，并且在其出现异常情况时，及时采取有效的补救措施，从而确保周围居民的人身安

全、降低造成的经济损失;淤地坝安全监测结果受多种因素影响,如淤积库容、滞洪库容、坝体稳定性等^[26]。本文根据黄土高原半干旱区的地质地貌特征、气候条件、流域淤地坝筑坝材料以及司家沟流域东沟和西沟淤地坝的实际情况,通过长时间监测和数据分析,提出淤地坝危险等级评估预警标准(表 4)。

表 4 淤地坝危险等级评估预警

Table 4 Warning table of danger grade evaluation of check dam

最大 3D 偏差位移量/mm	危险等级	预警等级
<4	基本安全	Ⅳ
4~7	轻度危险	Ⅲ
7~9	中度危险	Ⅱ
>9	重度危险	Ⅰ

本次研究将三维激光扫描技术应用于黄土高原半干旱区淤地坝安全监测,可以迅速高效地获取淤地坝连续完整的点云数据^[8-10],再配合 HD Scene,CC (Cloud compare)和 Geomagic Control 等软件进行数据处理和建模分析,使得淤地坝安全监测工作更加精准可靠;实践证明:三维激光扫描技术比传统的变形监测数据采集效率更高、数据获取速度更快、数据分辨率更高、测量精度更高,并且该技术具有无接触测量、自动化、全天候、不受天气影响等优点^[27-28]。但是由于三维激光扫描过程中受黄土高原半干旱区独特的地理面貌的影响^[1],在后续的扫描过程中可在淤地坝坝体中埋设相应的传感装置,提高野外工作效率;除此之外,还可以在淤地坝上布设雨量计、水位计、渗压计、应力计、地表位移站、视频站等监测设备,实时观测淤地坝遥感影像、视频监控、日常水位及降雨量等基本信息,简便快捷地了解淤地坝的病险情况,从而实现淤地坝安全自动化监测,提升黄土高原半干旱区淤地坝安全监测管理能力^[29-30]。

3 结 论

(1) 东沟淤地坝点云模型在偏移距离为-0.05~0.05 cm 的区间内点云数量占比为 67.16%,最大的点云 3D 偏差位移量不超过 0.2 cm;西沟淤地坝点云模型在偏移距离为-0.1~0.1 cm 的区间内点云数量占比达到了 77.56%,最大的点云 3D 偏差位移量不超过 0.4 cm;说明两坝形变符合淤地坝的形变规律,两坝坝体整体形变程度较小,均处于稳定运行状态。

(2) 西沟淤地坝点云模型发生位置偏移的点云数量为 506 850,多于东沟淤地坝点云模型发生位置偏移的点云数量 308 673,并且其最大 3D 偏差位移量、最小 3D 偏差位移量、平均“+”偏差位移量以及平均“-”偏差位移量均比东沟淤地坝的要大。说明

该地区汛期降水对两坝坝体形变均有影响,但对西沟淤地坝的影响程度更为明显。

(3) 西峰区 2018 年 1—5 月份和 10—12 月份月降水量较少,两座淤地坝处于稳定状态;5—7 月份月降水量上升 589.17%,两座淤地坝所受水压分量上升导致坝体产生形变,此时坝体形变达到最大程度;7—10 月份月降水量大幅下降,两坝坝体逐渐恢复到稳定状态;说明淤地坝坝体发生形变时间主要在汛期(6—9 月份),在汛期前后对淤地坝进行监测是可行的。

(4) 本研究建立了甘肃省庆阳市司家沟流域东沟和西沟两座淤地坝在汛期前后的点云模型,并且使用“3D 偏差位移量”来衡量淤地坝的形变,偏差分析精度达到了 0.001 mm,可以精确地分析淤地坝的形变量,进而分析淤地坝点云模型的整体 3D 偏差位移量。本研究技术及方法也同样适用于黄土高原半干旱区其他淤地坝安全监测。

参考文献(References):

[1] 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):241-244,275.
Zhang F, Zhou B, Li F, et al. Application of 3D laser scanning technology in safety monitoring of silt dams [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37 (5):241-244,275.

[2] Suwatthikul J, Vanijirattikhan R, Supakchukul U, et al. Development of dam safety remote monitoring and evaluation system[J]. Journal of Disaster Research, 2021, 16(4):607-617.

[3] Martać R, Milivojević N, Despotović-Zrakić M, et al. Enhancing large dam safety using IoT technologies: A case of a smart dam[J]. Journal of Universal Computer Science, 2020,26(5):583-603.

[4] Seyed-Kolbadi S M, Hariri-Ardebili M A, Mirtaheeri M, et al. Instrumented health monitoring of an earth dam [J]. Infrastructures, 2020,5(3):26.

[5] 王培成,包腾飞,朱茜.基于 BIM 的大坝安全监测信息管理系统开发研究[J].水电能源科学,2019,37(4):72-75.
Wang P C, Bao T F, Zhu X. Research on development of dam safety monitoring information management system based on BIM[J]. Water Resources and Power, 2019,37(4):72-75.

[6] 张芳,辛俊龙,李艳玲,等.改进云模型在大坝安全监测数据异常识别中的应用[J].水电能源科学,2022,40(3):114-117.
Zhang F, Xin J L, Li Y L, et al. Application of improved cloud model in anomaly recognition of dam safety monitoring data[J]. Water Resources and Power, 2022,40(3):114-117.

[7] 余再康,程井.贵州省水库运行及安全监测监管系统关键技术[J].河海大学学报:自然科学版,2023,51(4):46-54.

- Yu Z K, Cheng J. Key technologies of supervision system for reservoir operation and safety monitoring in Guizhou Province [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2023, 51(4): 46-54.
- [8] 张立, 宋莉. 三维激光扫描技术在建筑立面测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2019(9): 152-154.
Zhang L, Song L. Application of 3D laser scanning technology in surveying and mapping of building facade[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(9): 152-154.
- [9] 王举, 张成才. 基于三维激光扫描技术的土石坝变形监测方法研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2345-2350.
Wang J, Zhang C C. Deformation monitoring of earth-rock dams based on three-dimensional laser scanning technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2345-2350.
- [10] 范泯进, 朱燕梅, 张宏达, 等. 基于三维激光扫描的高精度大坝变形监测技术研究[J]. 水利技术监督, 2023, 183(1): 32-35.
Fan M J, Zhu Y M, Zhang H D, et al. Research on high-precision dam deformation monitoring technology based on 3D laser scanning[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2023, 183(1): 32-35.
- [11] 甘肃省统计局, 国家统计局甘肃调查总队. 甘肃发展年鉴[Z]. 中国统计出版社, 2020.
Gansu Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Gansu. Gansu Development Yearbook[Z]. China Statistics Press, 2020.
- [12] 高雅玉, 张新民, 于惠. GIS技术在陇东沟道雨洪资源可利用量分析中的应用[J]. 中国水利, 2015(19): 62-64.
Gao Y Y, Zhang X M, Yu H. Using GIS for analyzing water availability of rain and storm in drainage system [J]. China Water Resources, 2015(19): 62-64.
- [13] 高雅玉, 张新民, 田晋华, 等. 基于GIS的西峰区沟道雨洪资源可利用量研究[J]. 水文, 2017, 37(1): 72-78.
Gao Y Y, Zhang X M, Tian J H, et al. Research on available channel rainwater resources in Xifeng district based on GIS technology[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1): 72-78.
- [14] 高雅玉, 田晋华, 李嘉楠. 基于水土资源高效利用的淤地坝建设潜力分析[J]. 人民黄河, 2019, 41(9): 102-105, 109.
Gao Y Y, Tian J H, Li J N. Check-dam construction potential analysis based on efficient use of water and soil resources[J]. Yellow River, 2019, 41(9): 102-105, 109.
- [15] Li B, Yang J, Hu D X. Dam monitoring data analysis methods: A literature review[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(3): e2501.
- [16] Wang L B, Mao Y C, Cheng Y K, et al. Deep learning-based diagnosing structural behavior in dam safety monitoring system[J]. Sensors, 2021, 21(4): 1171.
- [17] 梁周雁, 邵为真, 孙文潇, 等. 基于PCL的点云数据空间管理及近邻搜索[J]. 北京测绘, 2018, 32(1): 52-57.
Liang Z Y, Shao W Z, Sun W X, et al. Space management of point cloud and searching nearest neighbors based on point cloud library[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2018, 32(1): 52-57.
- [18] 柳志坤, 周兰庭. 分形-V/S法在大坝位移安全监测资料分析中的应用[J]. 水电能源科学, 2021, 39(5): 97-101.
Liu Z K, Zhou L T. Application of fractal V/S in dam displacement safety monitoring data analysis[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(5): 97-101.
- [19] 刘龙龙, 张继贤, 王世杰, 等. 新型FMCW地基SAR和三维激光扫描仪在大坝变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2019(3): 76-80.
Liu L L, Zhang J X, Wang S J, et al. Application of new FMCW ground-based SAR and three-dimensional laser scanner in dam deformation monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(3): 76-80.
- [20] Markovic Brankovic J, Markovic M, Stosovic M A, et al. ANN model for prediction of rockfill dam slope stability [J]. Tehnički Vjesnik, 2021, 28(5): 1488-1494.
- [21] 王腾, Perissin D, Rocca F, 等. 基于时间序列SAR影像分析方法的三峡大坝稳定性监测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 110-123.
Wang T, Perissin D, Rocca F, et al. Stability monitoring of Three Gorges Dam based on time series SAR image analysis method[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2011, 41(1): 110-123.
- [22] 高健翎, 陈小科, 张佃茂. 黄土高原地区淤地坝现状分析[J]. 中国水土保持, 2023(1): 1-5.
Gao J L, Chen X K, Zhang D M. Current situation of warping dams in the Loess Plateau[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(1): 1-5.
- [23] 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.
Yu Q G, Ma A L. Silt storage dam monitor at small watershed in Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 118-123.
- [24] 祖强, 陈祖煜, 于沭, 等. 极端降雨条件下小流域淤地坝系连溃风险分析[J]. 水土保持学报, 2022, 36(1): 30-37.
Zu Q, Chen Z Y, Yu S, et al. Risk analysis of check dam system under extreme rainfall in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(1): 30-37.
- [25] 吕彦勋, 马瑞, 张富, 等. 以临发暴雨为导向的淤地坝溃坝预警模型研究及应用[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(1): 90-99.
Lv Y X, Ma R, Zhang F, et al. Construction and application of a dam failure risk model for silt dams during heavy rainfall[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(1): 90-99.

- (1):1-14.
- Liu D S, Zhang Z H. Loess in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1962,42(1):1-14.
- [22] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].*水土保持研究*,2014,21(3):20-24.
- Sun Y Z, Zheng F L, Zhang J. Analysis of gully erosion development based on LIDAR and GIS[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014,21(3):20-24.
- [23] Cavalli M, Goldin B, Comiti F, et al. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models[J]. *Geomorphology*, 2017,291:4-16.
- [24] Winiwarter L, Anders K, Höfle B. M3C2-EP: Pushing the limits of 3D topographic point cloud change detection by error propagation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021,178:240-258.
- [25] Mukupa W, Roberts G W, Hancock C M, et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures[J]. *Survey review*, 2017,49(353):99-116.
- [26] Wang N, Yao Z H, Liu W Q, et al. Spatial variabilities of runoff erosion and different underlying surfaces in the Xihe River Basin[J]. *Water*, 2019,11(2):352.
- [27] 李朋飞,张晓晨,党旭,等.基于三维激光扫描的坡沟系统侵蚀产沙过程研究[J].*水土保持研究*,2023,30(2):13-21.
- Li P F, Zhang X C, Dang X, et al. Investigation of erosion processes on the slope-gully system using 3D laser scanning[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(2):13-21.

~~~~~

(上接第 66 页)

- [26] 马瑞,张富,周波,等.甘肃省淤地坝工程的溃坝风险评估模型[J].*水土保持通报*,2021,41(4):139-144.
- Ma R, Zhang F, Zhou B, et al. Risk assessment model for dam break in Gansu Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021,41(4):139-144.
- [27] 罗鹏飞,董燕君.超高土石坝变形监测新技术探讨[J].*人民黄河*,2022,44(S2):275-277.
- Luo P F, Dong Y J. Discussion on new deformation monitoring technology of ultra-high earth-rock dam[J]. *Yellow River*, 2022,44(S2):275-277.
- [28] 万智勇,黄耀英,赵新瑞,等.三维激光扫描技术在面板堆石坝挤压边墙变形监测中的应用[J].*长江科学院院报*,2017,34(6):56-61.
- Wan Z Y, Huang Y Y, Zhao X R, et al. Application of three-dimensional laser scanning technique in deformation monitoring of extrusion sidewall of concrete-faced rockfill dam[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2017,34(6):56-61.
- [29] 马松增,徐建昭,何明月,等.河南省淤地坝安全自动化监测系统设计与应用[J].*水土保持通报*,2020,40(5):112-117.
- Ma S Z, Xu J Z, He M Y, et al. Design and application of automatic safety monitoring system for soil-saving dams in Henan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020,40(5):112-117.
- [30] 于沐,李颖哲,姚雪飞,等.淤地坝系风险预警防控平台研究与应用[J].*水土保持通报*,2023,43(1):84-91.
- Yu S, Li Y Z, Yao X F, et al. Research and application of risk warning prevention and control platform for check dam systems[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(1):84-91.

~~~~~

(上接第 74 页)

- [15] Liu B Y, Zhang K L, Xie Y. An empirical soil loss equation [C]// *Proceedings 12th international soil conservation organization conference*. Beijing: Tsinghua University Press. 2002.
- [16] 赖承义,左舒翟,任引.不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J].*生态学报*,2021,41(12):4913-4922.
- Lai C Y, Zuo S D, Ren Y. Impacts of different ecological restoration measures and environmental factors on water and soil conservation of the slope in the pure coniferous forest of the subtropical red soil area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(12):4913-4922.
- [17] 汤崇军,刘宇,徐爱珍,等.红壤径流小区覆被格局的水土保持效应评价[J].*中国水土保持科学*,2020,18(2):36-42.
- Tang C J, Liu Y, Xu A Z, et al. Effect assessment of land cover pattern on soil and water loss on red soil plots[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(2):36-42.
- [18] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):133-138,144.
- Wu L, Mu X M, Gao P, et al. Effects of vegetation coverage on runoff and sediment yield in the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019,26(6):133-138,144.