

# 黄土丘V区典型小流域坝控区重力侵蚀分析与预测

高哲<sup>1</sup>, 张富<sup>1</sup>, 高建恩<sup>2,3</sup>, 赵传燕<sup>4</sup>,  
张宏奎<sup>1</sup>, 戚继阳<sup>5</sup>, 白玉琪<sup>6</sup>, 李晓雅<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730000;  
5. 宁夏绿丰源工程咨询有限公司, 银川 750000; 6. 定西师范高等专科学校, 甘肃 定西 743000)

**摘要:** 黄土丘V区因其独特的土壤及地形和水文地质条件, 使淤地坝坝控区的重力侵蚀严重, 以至于毁坏耕地、道路和桥梁等, 严重影响淤地坝效益的发挥。针对黄土丘V区典型小流域坝控区在运行期间因沟岸崩塌和岸坡滑塌等产生的重力侵蚀导致淤地坝泥沙淤积量计算失真的问题, 采用实测库容与3S技术生成库容资料和原设计库容曲线复核率定的三重复核分析方法, 对运行期淤地坝坝控区域的重力侵蚀来源、诱发因素及预测进行分析。结果表明: (1) 反映淤地坝淤积形态的形态判别系数 $\alpha'$ 为0.711~208.517, 均值48.238, 说明除阳山上小型坝小于临界数2.2为椎体淤积外, 其他淤地坝为三角洲淤积; (2) 坝控区形态参数如淤积面面积、周长、淤积体积及淤积形态判别系数等对重力侵蚀影响较大, 给出了重力侵蚀量及侵蚀模数的计算关系; (3) 重力侵蚀模数的范围184.79~812.80 t/(km<sup>2</sup>·a), 均值360.68 t/(km<sup>2</sup>·a), 坝控区淤积产沙模数的范围225~2 719 t/(km<sup>2</sup>·a), 均值1 382 t/(km<sup>2</sup>·a)。重力侵蚀模数约占淤积产沙模数的26.1%, 说明在黄土丘陵沟壑区第V副区淤地坝的库区拦沙既有上游因水力侵蚀产沙又有库区自身重力侵蚀所致, 淤地坝的运行管理既要防止重力侵蚀破坏现有耕地, 又要防止淤地坝淤积出的土地被沟道基流苦咸水破坏, 从而导致淤地坝淤地无法高效利用。

**关键词:** 3S技术; 淤地坝; 重力侵蚀; 侵蚀模数

**中图分类号:** S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0107-06

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2018.03.017

## Analysis and Prediction of Gravity Erosion in Typical Small Watershed in the Fifthsub-region of Huangtu Hilly Area

GAO Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Fu<sup>1</sup>, GAO Jianen<sup>2,3</sup>, ZHAO Chuanyan<sup>4</sup>,  
ZHANG Hongkui<sup>1</sup>, QI Jiyang<sup>5</sup>, BAI Yuqi<sup>6</sup>, LI Xiaoya<sup>1</sup>

(1. The College of Forestry in Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100; 4. College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000; 5. NingXia Green FengYuan Engineering Consulting Co. Ltd., Yinchuan 750000; 6. Department of Geography, Dingxi Teachers College, Dingxi, Gansu 743000)

**Abstract:** This paper aimed at the problem that the calculation of siltation amount of silt dam caused by gravity erosion because of gully bank collapse and slope collapse during the operation of 5th sub-region silt dam on the Loess Plateau. By the method of actual measurement and 3S technique generation and original design of reservoir capacity curve, the silt blocking amount and soil erosion mode of silt dam during running period were checked and analyzed. The results showed that, (1) The morphological discriminant coefficient ( $\alpha'$ ), which reflects the silt form of silt dam, is between 0.711 and 208.517, and the mean value is 48.238. it indicated that the other silt dams were Delta deposition except Yangshan, which were the Vertebral siltation because the critical number were less than 2.2; (2) The shape parameters of dam controlling area, such as area of silt surface, circumference, silt volume and discriminant coefficient of silt form, had great influence on gravity erosion. The calculation relation of gravity erosion amount and erosion modulus were given;

收稿日期: 2018-04-12

资助项目: 陕西省自然科学基础研究计划重大基础研究项目(2016ZDJC-20); 国家自然科学基金项目(41571051)

第一作者: 高哲(1990—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事水土保持工程的规划设计及水土资源高效利用研究。E-mail: 381765986@qq.com

通信作者: 张富(1961—), 男, 甘肃定西人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持措施对位配置及径流聚集工程技术研究。E-mail: zhangfu@gsau.edu.cn

(3) The range of the modulus of gravity erosion is  $184.79 \sim 812.80 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , the mean value is  $360.68 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , and the range of modulus of siltation and sediment production in dam controlling area was  $225 \sim 2\,719 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , with a mean value of  $1\,382 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ . The modulus of gravity erosion accounts for 26.1% of the modulus of sediment production. The above results showed that the reservoir sediment came from the hydraulic erosion and the gravity erosion of the reservoir area in the 5th sub-region of the Loess Plateau. The operation and management of the silt dam should prevent the gravity erosion from destroying the existing cultivated land and silt of channel base flowered dam land. These could result in the silt dam being not able to be used efficiently.

**Keywords:** 3S technology; check dam; gravitational erosion; erosion modulus

淤地坝作为一种在黄土高原地区小流域综合治理中的重要工程措施,在拦沙淤地、减缓河流下游泥沙淤积及发展农业生产发挥重要的作用,使其在黄土高原乃至全国不同地区的水土保持治理中得到了广泛的推广和应用。但在黄土丘陵沟壑区第Ⅴ副区,由于水质苦咸,淤积坝地多为盐碱地,导致生产力低下;库区重力侵蚀严重,影响库区原有耕地、道路和桥梁安全。由于重力侵蚀不仅受来水来沙条件影响,还与本地区地质水文条件有关,对其进行预测相对困难,加之随着淤地坝运行年限的增加,淤地达到或超过了原设计淤积高程,极可能造成滞洪库容不足,导致淤地坝在后期运行期间存在质量及安全隐患。因此快速准确地测算及预测淤地坝坝控区淤积量包括重力侵蚀量及诱发因素是一个重要问题。

关于坝控区重力侵蚀研究,国外多关注坝控区泥沙总淤积量的计算方法,对泥沙淤积的侵蚀方式则涉及较少。Iván 等<sup>[1]</sup>研究了对淤地坝截流的泥沙测算的几种方法,如棱镜法、金字塔法等,并对 25 座典型淤地坝进行了相应分析和综合评价,结果表明目前的方法计算差别较大;Singh 等<sup>[2]</sup>提出了一种新型的用于监测和评价小流域中径流和泥沙产量的人工神经网络模型;Wei 等<sup>[3]</sup>讨论了一种基于径流预测曲线和强度持续率曲线的泥石流危险性评价方法,并且通过数据分析表明该方法是具有较好的预测能力。但对淤地坝把控区域的泥沙的侵蚀方式涉及较少。

重力侵蚀在流域侵蚀所占的比重愈来愈大,特别是影响土地利用、道路桥梁建设与运行等,国内研究愈来愈重视。已有研究<sup>[4-8]</sup>运用水力学、土力学等力学方法对重力侵蚀主要影响因素及侵蚀机理进行分析,建立起沟坡重力侵蚀的概化力学模型继而给出预报条件,但对群体侵蚀量预测则涉及较少;前人<sup>[9-14]</sup>在总结黄土高原重力侵蚀研究的基础上,认为目前研究工作从不同方面探索了黄土高原重力侵蚀的研究方法,揭示了重力侵蚀对流域产沙的重要作用。但是,由于重力侵蚀产沙的实测资料比较缺乏,当前的

研究往往只能根据水—沙关系对重力侵蚀进行间接分析,或基于短期、小范围的野外实地观测资料进行定量分析,研究结果明显具有一定的推测性,代表性不足。针对上述不足,杨吉山等<sup>[4]</sup>挑选岔巴沟流域中 6 个淤地坝小流域,以实测的坝库中 22 年泥沙淤积量作为流域泥沙总侵蚀量,采用中国土壤侵蚀流失模型(CSLE)并考虑沟蚀因素计算水力侵蚀量,将水力与重力侵蚀产沙量区分开来。试图基于比较准确的流域土壤侵蚀量数据,在比较长的时间段内,用更直接的方法定量分析典型小流域中的重力侵蚀产沙量,结果表明流域重力侵蚀量可高达 67.0%。由于是利用中国土壤侵蚀流失模型(CSLE)进行间接推求,重力侵蚀产沙的实测资料比较缺乏,间接求出的重力侵蚀量则需要进一步验证。总之,当前关于重力侵蚀量的研究以间接计算方法居多,研究结果的代表性不足。所以,如何采用实测资料进行直接验证就是一个重要的问题。

本研究基于实测与 3S 技术生成和原设计库容曲线相比对的三重复核方法,在现场勘测并对其结果进行分析基础上,对运行期淤地坝控区域的重力侵蚀来源、诱发因素及预测进行分析,为预防和减少区域性土壤侵蚀、保障坝控区域内土地安全,实现提高淤地坝坝地生产力,为实现淤地坝坝控区及所在流域水资源的高效利用提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区西北部称钩河流域,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,是黄土高原坝系建设试点流域及重点监测流域。海拔  $1\,957 \sim 2\,273 \text{ m}$ ,相对高差 316 m。地理位置东经  $104^{\circ}14'15'' \sim 104^{\circ}28'31''$ ,北纬  $35^{\circ}41'07'' \sim 35^{\circ}35'10''$ ,流域总面积  $160.57 \text{ km}^2$ 。土壤主要以黄绵土、黑垆土为主。流域内无天然林分布,主要人工林树种有青杨(*Populus cathayana*)、榆树(*Ulmus pumila*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等,人工种草以紫花

苜蓿(*Medicagosativa*)为主,主要的整地方式为鱼鳞坑、水平阶等,天然植被属半干旱草原草场类,草种主要有芨芨草(*Achnatherumsplendens*)、野棉花(*Anemone viti-folia*)、狼毒(*Stellerachamaejasme*)等。气候属中温带半干旱气候,多年平均气温 6.3 ℃,≥10 ℃积温 2 239 ℃,年日照时间 2 500 h,无霜期 141 d,年均降水量 380 mm,

降水在时间上分布严重不均,多集中在 7—9 月,且多以暴雨形式出现,年蒸发量达 1 500 mm 以上。

1.2 流域测点选择

本研究选取称钩河流域中别杜川骨干坝、谢家坪中型坝和沟坪上小型坝等 10 座典型淤地坝作为研究对象,各淤地坝地理位置和原设计参数见表 1。

表 1 各坝地理位置及原始设计参数

| 序号 | 坝名  | 地理位置       |           | 建坝时间                    | 坝高/m  | 库容/(万 m <sup>3</sup> ) |       |       |
|----|-----|------------|-----------|-------------------------|-------|------------------------|-------|-------|
|    |     | 东经         | 北纬        |                         |       | 总库容                    | 拦泥    | 滞洪    |
| 1  | 崖头湾 | 104°26′16″ | 35°36′40″ | 2003 年 9 月—2005 年 10 月  | 25.45 | 50.54                  | 21.84 | 28.70 |
| 2  | 别杜川 | 104°25′29″ | 35°37′47″ | 2005 年 4 月—2007 年 9 月   | 27.00 | 90.68                  | 46.52 | 44.16 |
| 3  | 姚门坪 | 104°25′15″ | 35°38′03″ | 2005 年 3 月—2006 年 6 月   | 23.00 | 50.93                  | 26.13 | 24.80 |
| 4  | 安子坪 | 104°24′53″ | 35°38′23″ | 2003 年 9 月—2005 年 3 月   | 28.00 | 56.94                  | 21.02 | 35.92 |
| 5  | 崖湾里 | 104°25′00″ | 35°38′58″ | 2005 年 8 月—2007 年 7 月   | 19.00 | 50.18                  | 23.46 | 26.72 |
| 6  | 谢家坪 | 104°26′37″ | 35°35′55″ | 2006 年 8 月—2007 年 11 月  | 18.00 | 10.48                  | 4.52  | 5.96  |
| 7  | 碱滩里 | 104°26′33″ | 35°36′18″ | 2005 年 9 月—2005 年 10 月  | 15.00 | 10.72                  | 4.91  | 5.81  |
| 8  | 庙川里 | 104°26′07″ | 35°36′22″ | 2007 年 7 月—2007 年 10 月  | 15.00 | 14.87                  | 6.81  | 8.06  |
| 9  | 阳山上 | 104°26′43″ | 35°36′24″ | 2005 年 11 月—2005 年 12 月 | 10.00 | 3.80                   | 1.27  | 2.53  |
| 10 | 沟坪上 | 104°26′42″ | 35°35′54″ | 2006 年 9 月—2006 年 11 月  | 13.50 | 3.16                   | 1.06  | 2.10  |

1.3 数据来源与研究方法

1.3.1 数据来源 本研究 3 套数据分别来源于原始设计图纸、称钩河万分之一地形图和现场实测值。其中,从原始设计图纸《别杜川坝库容计算表》中摘录出高程及其对应面积和库容原始设计值;利用称钩河流域万分之一地形图前期在 Arc GIS 10.2 软件中进行的等高线矢量化后,对别杜川坝进行定位,而后对该坝系所控制流域面积内等高线进行定位,利用 Arc GIS 10.2 软件中数据管理、要素转面等工具分别对不同高程下面积值进行计算,而后推算出各高程下对应库容值;现场对该坝高程进行测量,使用的仪器是南方 NTS332R 型全站仪,该仪器测角精度为 2′,免棱镜测距为 350 m,单棱镜测距为 2 km,单棱镜测距精度为 2+2 ppm。测量前先对坝体的走向、坝坡坡度、坝外出水沟和坝体左右肩部地貌进行综合分析后选择出合适的测站位置进行测量继而获得实测原始地形数据,利用南方 CASS 7.0 软件将测量所得地形数据绘制成 CAD 图,最后利用 Arc GIS 10.2 软件将其导入并进行面积计算,最终得出所测各高程下对应

库容值和重力侵蚀值。

1.3.2 研究方法 由于淤地坝坝体及附属构筑物均为土质结构,所在高程易被风力、流水侵蚀继而发生变化,而卧管通气孔和涵管出水口为混凝土结构,高程相对稳定,故采用高程去推求测站高程<sup>[15-17]</sup>。这样,高程范围与坝体原设计高程一致。由于待对比分析的 3 套数据分别源于原设计图纸、万分之一地形图和现场实地测量,且三者时间的间隔较为久远,现实地形地貌会因各种侵蚀造成所提取出的高程范围存在误差,所以在实际对比分析前,需对 3 者数据的高程范围进行二次校核从而达到范围一致。三者高程范围二次校核需以称钩河万分之一地形图提取出的该淤地坝所控区域高程范围为准,并结合原始设计图纸中坝高等基础参数进行校核,以求达到高程范围相对一致。后期现场实测主要以 Arc GIS 10.2 软件对典型淤地坝进行定位,在现场以手持 GPS 定位仪、红外测距仪和皮尺等仪器对现场淤地坝在运行期间沟岸崩塌和岸坡滑塌的重力侵蚀量进行定位和等量代换测量。最后用 Excel 和 SPSS 软件进行分析。本研究技术路线见图 1。

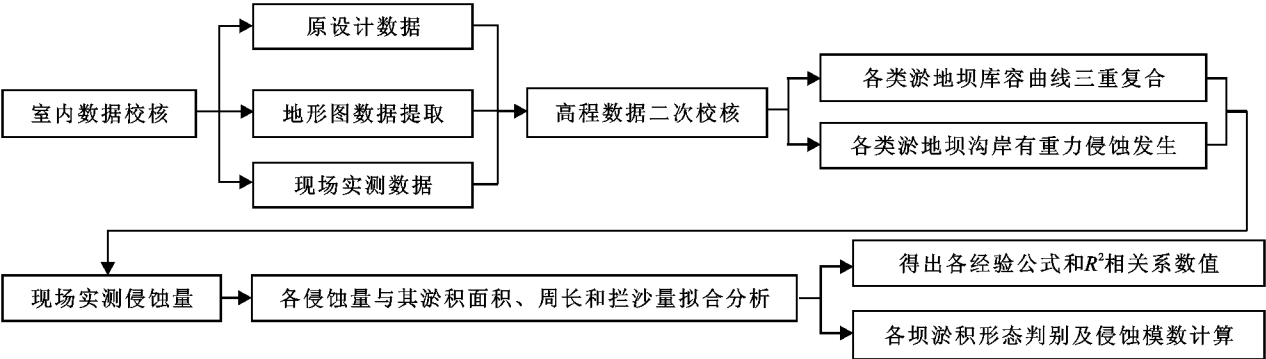


图 1 研究技术路线

2 结果与分析

2.1 淤地坝库容曲线三重复核

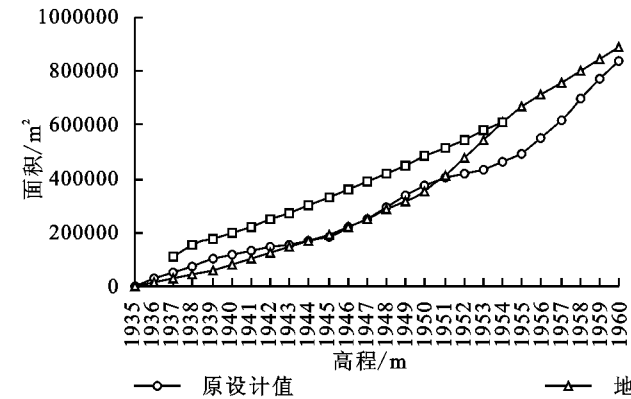
由上述对三者数据的二次处理与校核后,同时得出在同一高程范围内,该典型淤地坝“高程—面积”和“高程—库容”比对分析。由于现场测量时仪器是架设在泥沙实际淤积层面进行高程测设而非该淤地坝原设计高程最低点,理论上统一的高程范围可用万分之一地形图提取计算出的对应高程库容值进行替代,最终将泥沙淤积面上和淤积面下库容值进行叠加后得实测库容值。根据实测库容值,可利用土壤侵蚀模数,计算公式<sup>[18]</sup>为:

表 2 淤地坝运行期间坝控区域内侵蚀模数

| 序号 | 坝名  | 淤积总容量/<br>m <sup>3</sup> | 容重/<br>(t·m <sup>-3</sup> ) | 淤积总量/<br>t | 坝控面积/<br>km <sup>2</sup> | 淤积时间/<br>a | 淤积侵蚀模数/<br>(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|----|-----|--------------------------|-----------------------------|------------|--------------------------|------------|---------------------------------------------------|
| 1  | 崖头湾 | 82910                    | 1.35                        | 111928.50  | 3.90                     | 11         | 2609                                              |
| 2  | 别杜川 | 71837                    | 1.35                        | 96979.95   | 6.00                     | 9          | 1796                                              |
| 3  | 姚门坪 | 16305                    | 1.35                        | 22011.75   | 3.37                     | 10         | 653                                               |
| 4  | 安子坪 | 78255                    | 1.35                        | 105644.25  | 4.88                     | 11         | 1968                                              |
| 5  | 崖湾里 | 54213                    | 1.35                        | 73187.55   | 3.63                     | 9          | 2240                                              |
| 6  | 谢家坪 | 19035                    | 1.35                        | 25697.25   | 1.05                     | 9          | 2719                                              |
| 7  | 碱滩里 | 6580                     | 1.35                        | 8883.00    | 1.14                     | 11         | 708                                               |
| 8  | 庙川里 | 2656                     | 1.35                        | 3585.60    | 1.58                     | 9          | 252                                               |
| 9  | 阳山上 | 1084                     | 1.35                        | 1463.40    | 0.59                     | 11         | 225                                               |
| 10 | 沟坪上 | 2346                     | 1.35                        | 3167.10    | 0.49                     | 10         | 646                                               |

注:本表计算中容重值以历年监测站所取容重值为准。

勘测及室内复核结果表明,实测淤积量与原库容曲线相差较大;图 2 为从该流域 10 座典型淤地坝中选取姚门坪骨干坝库容曲线复核结果。由图 2 可知,淤地坝经其原设计、万分之一地形图和现场实测 3 套数据对比分析后,得出在同一高程范围及对应各自高程点,三者库容值大小为现场实测值>地形图取值>原设计值,期间仅在不同高程范围处对应库



2.2 淤地坝重力侵蚀量的现场勘测与分析

2.2.1 坝控区重力侵蚀勘测 针对上述分析结果,经现场对其 10 座典型淤地坝进行的实地勘测,各类淤地坝均在其泥沙淤积的不同高程或高程范围内有不同程度的重力侵蚀现象发生。截止 2017 年 8 月,10 座典型淤地坝中有 7 座出现因重力侵蚀而显现的

$$M_i=A_i/(S\cdot a) \tag{1}$$

式中: $A_i$  为第  $i$  个沉积悬回的泥沙沉积量(t),在此对有一定淤积年限的淤地坝而言,此处使用实际淤积总量; $s$  为小流域流域面积(km<sup>2</sup>),在此指坝控面积; $a$  为小流域的侵蚀时间,在此指建成坝体的运行时间(a)。

由表 2 可知,该流域 2005—2016 年,流域平均侵蚀模数为 1 382 t/(km<sup>2</sup>·a),最大侵蚀模数为 2 719 t/(km<sup>2</sup>·a),最小侵蚀模数为 225 t/(km<sup>2</sup>·a)。可以看出,当坝控面积大于 3.5 km<sup>2</sup>,则侵蚀模数超过 1 500 t/(km<sup>2</sup>·a);当坝控面积小于 3.5 km<sup>2</sup> 时,则侵蚀模数小于 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)。

容值出现差异。进一步勘察表明,出现上述差异的原因是各类淤地坝在同一高程范围内现场实际泥沙淤积量已超出原设计泥沙淤积范围,淤积库容增大,主要是由于淤地坝在运行期间该坝所控区域沟道两侧因时间推移出现不同程度的重力侵蚀,最终造成其两侧沟沿线外扩,在同一高程层面实际泥沙淤积值大于原始设计值。

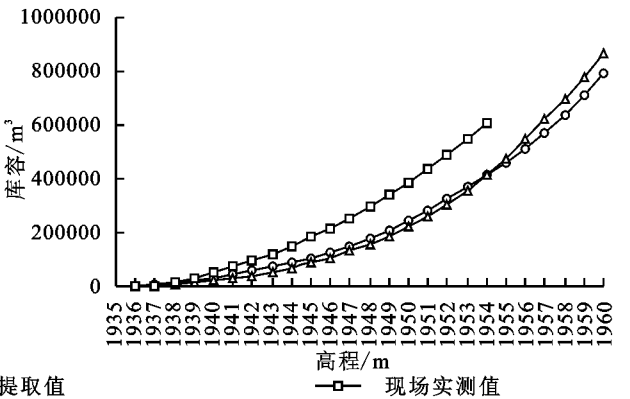


图 2 称沟河流域典型淤地坝库容复核分析曲线

沟岸崩塌和滑塌现象,另外 3 座未发生。通过室内校核和现场勘测可以看出,现场发生重力侵蚀的地方多是在地形陡峭及淤地出现积水处,主要有 3 个特点:(1)发生重力侵蚀的边坡土体构造坡度较陡且出现临空状态,表面土石外张力较大,由于受力不均情况下发生侵蚀现象且多出现在坝控区的沟台地处,导致土

地资源破坏(图 3a);(2)现场两岸边坡土石较为松散,易出现崩塌破坏(图 3b);(3)各淤积坝地面及边坡表面缺乏植物覆盖,人工保护措施较为薄弱,且淤积坝崩塌体底部出现大面积积水现象(图 3c)。

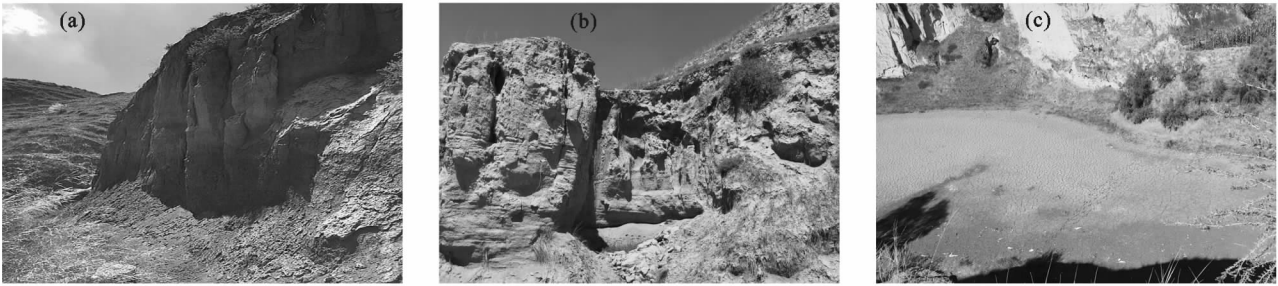


图 3 称沟河流域典型淤地坝现场勘测

根据出现重力侵蚀的 6 座淤地坝现场实测结果,计算出不同淤地坝坝控区重力侵蚀模数。由表 3 可知,各坝控区域重力侵蚀模数的范围 184.79~812.80 t/(km<sup>2</sup>·a),平均值为 360.68 t/(km<sup>2</sup>·a)。与表 2 中坝控区淤积体比较,坝控区淤积产沙模数的范围 225~2 719 t/(km<sup>2</sup>·a),均值 1 382 t/(km<sup>2</sup>·a)。重力侵蚀模数约占淤积产沙模数的 26.1%。说明坝控区重力侵蚀量较大,不容忽视。进一步勘察表明,坝控区重力侵蚀的发生次数和量与淤地坝的坝控区形态及泥沙淤积形态有关。

表 3 淤地坝运行期间坝控区域内重力侵蚀模数计算

| 序号 | 坝名  | 重力侵蚀体积/<br>m <sup>3</sup> | 容重/<br>(t·m <sup>-3</sup> ) | 重力侵蚀量/<br>t | 坝控面积/<br>km <sup>2</sup> | 重力侵蚀模数/<br>(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|----|-----|---------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------------|---------------------------------------------------|
| 1  | 崖头湾 | 1098.52                   | 1.35                        | 1483.00     | 3.90                     | 380.26                                            |
| 2  | 别杜川 | 821.28                    | 1.35                        | 1108.73     | 6.00                     | 184.79                                            |
| 3  | 姚门坪 | 615.80                    | 1.35                        | 831.33      | 3.37                     | 246.69                                            |
| 4  | 崖湾里 | 782.55                    | 1.35                        | 1056.44     | 3.63                     | 291.03                                            |
| 5  | 庙川里 | 290.84                    | 1.35                        | 392.63      | 1.58                     | 248.50                                            |
| 6  | 阳山上 | 355.22                    | 1.35                        | 479.55      | 0.59                     | 812.80                                            |

注:容重值以监测站历年所取容重值为准;另 4 座坝因无重力侵蚀发生或无监测数据而未列入。

2.2.2 坝控区淤积形态参数变化对重力侵蚀的影响

(1)坝控区的淤积面周长、面积和体积对重力侵蚀量的影响。在现场实地勘测得各淤地坝对应高程处因滑坡和沟岸崩塌而出现的不同程度重力侵蚀,利用红外测距仪、钢尺及后期在 Arc GIS 10.2 软件中进行定位及交叉比对,将重力侵蚀量用等量代换的方式进行测算及求和。在对其 7 座淤地坝的重力侵蚀量、淤积面周长、淤积面积、拦沙量进行分析。由表 4 可知,其趋势线得出的相关系数 R<sup>2</sup> 分别为 0.708, 0.764, 0.754,表明重力侵蚀与在线、面、体比较,与淤积体相关性较显著,相关系数 R<sup>2</sup> 在 0.7~0.8 范围内,以淤积面积和形态判别系数相关关系较好,在实际应用过程中可根据需要和实测资料分别求坝控区年重力侵蚀量和侵蚀模数。

表 4 重力侵蚀量与各变量拟合

| 拟合经验方程式                      | R <sup>2</sup> | 适用范围                       |
|------------------------------|----------------|----------------------------|
| $w=0.4846L+182.43$           | 0.708          | 150~2000 m                 |
| $w=212.46\ln A-1577.4$       | 0.764          | 3600~150000 m <sup>2</sup> |
| $w=0.0347V+215.99$           | 0.754          | 1000~25000 m <sup>3</sup>  |
| $w=-100.8\ln \alpha'+679.72$ | 0.762          | 0.5~210                    |

注:W 表示重力侵蚀量 t/(km<sup>2</sup>·a);L 表示淤积面周长(m);A 表示淤积面积(m<sup>2</sup>);V 表示体积(m<sup>3</sup>);α'表示判别系数。

(2)坝控区的淤积形态系数对重力侵蚀的影响。勘察发现,不同类型淤地坝设计库容大小不同,其库区的几何形态和坝体泥沙淤积的形态不同。根据现场实测资料,对不同类型的淤地坝淤积面形态进行预估和分析,利用反映小型水库蓄水时泥沙淤积的淤积形态判别系数公式进行计算,判别公式为<sup>[19]</sup>:

$$\alpha'=\frac{V_1}{W_0J_0}$$

(2)

式中:α'为淤积形态判别系数。其中若 α'<2.2,则为锥体淤积;若 α'>2.2,则为三角洲或带状淤积,对于淤地坝为三角洲淤积;V<sub>1</sub> 为库容(m<sup>3</sup>),在此对有一定淤积年限的淤地坝而言,此处使用设计总库容;W<sub>0</sub> 为入库沙量(m<sup>3</sup>),在此对有一定淤积年限的淤地坝而言,指多年平均淤积量;J<sub>0</sub> 库区原河道比降,在此处指各淤地坝运行首年沟道原始比降值(%)。

由表 5 可知,3 种类型淤地坝依据实测资料得出其淤积形态判别系数 除阳山上小型坝外均大于临界数 2.2,说明除阳山上小型坝淤积形态为锥体淤积外其余淤地坝运行期间泥沙逐年淤积的形态为三角洲淤积形态。对其中 6 座淤地坝的淤积判别系数和对应的重力侵蚀模数进行分析,其相关系数 R<sup>2</sup> 为 0.762,表明二者相关性显著(表 4)。

表 5 各坝淤积形态参数汇总

| 序号 | 坝名  | 类型  | 库容/<br>(万 m <sup>3</sup> ) | 平均入库量/<br>m <sup>3</sup> | 比降/<br>‰ | 判别<br>系数 | 临界数 | 淤积<br>形态 |
|----|-----|-----|----------------------------|--------------------------|----------|----------|-----|----------|
| 1  | 崖头湾 | 骨干坝 | 50.54                      | 42928.00                 | 0.33     | 35.676   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 2  | 别杜川 | 骨干坝 | 90.68                      | 12080.00                 | 0.36     | 208.517  | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 3  | 姚门坪 | 骨干坝 | 50.93                      | 41358.00                 | 0.28     | 43.980   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 4  | 安子坪 | 骨干坝 | 56.94                      | 60634.00                 | 0.29     | 32.382   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 5  | 崖湾里 | 骨干坝 | 50.18                      | 19932.00                 | 0.31     | 81.212   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 6  | 谢家坪 | 中型坝 | 10.48                      | 15882.00                 | 0.54     | 12.220   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 7  | 碱滩里 | 中型坝 | 10.72                      | 29528.00                 | 0.36     | 10.085   | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 8  | 庙川里 | 中型坝 | 14.87                      | 18914.00                 | 0.84     | 9.359    | 2.2 | 三角洲淤积    |
| 9  | 阳山上 | 小型坝 | 3.80                       | 14926.00                 | 3.58     | 0.711    | 2.2 | 椎体淤积     |
| 10 | 沟坪上 | 小型坝 | /                          | /                        | /        | /        | /   | /        |

3 讨论与结论

(1)所选取的称沟河流域 10 座典型淤地坝经原设计、万分之一地形图和现场实测 3 套数据对比分析,得出在同一高程范围及对应各自高程点,三者库容值大小为:①骨干坝中现场实测值>地形图提取值>原设计值;②中型坝中三者库容值与实测值受选取数量限制,侵蚀较轻,数据基本趋于一致;③小型坝中三者库容数据整体趋于一致,仅在不同高程范围处对应库容值出现差异。说明各类淤地坝在同一高程范围内现场实际泥沙淤积量已超出原设计泥沙淤积范围,淤积库容增大,即出现不同程度的重力侵蚀,最终造成其两侧沟沿线外扩,可能会影响坝控区域内的土地利用。

(2)通过对坝控区域内重力侵蚀影响因素的分析,分别给出相应的计算关系方程。表明重力侵蚀分别与对应的“线、面、体”以及“形态判别系数”相关性较显著。其形态判别系数  $\alpha'$  在 0.711~208.517,均值为 48.238,除阳山上小型坝外其余均大于判别临界数 2.2,即淤积形态为三角洲淤积。

(3)重力侵蚀模数范围 184.79~812.80 t/(km<sup>2</sup>·a),均值 360.68 t/(km<sup>2</sup>·a),通过对重力侵蚀影响因素的分析,实际淤积产沙模数的范围 225~2 719 t/(km<sup>2</sup>·a),均值 1 382 t/(km<sup>2</sup>·a)。重力侵蚀模数约占淤积产沙模数的 26.1%。说明重力侵蚀来沙虽然较小,但对坝控区域土地利用较大,在淤地坝的运行及管理中应引起必要的重视。

综上所述,在黄土高原丘陵沟壑区第 V 副区淤地坝健康发展面临坝地受盐渍化影响和沟道两岸产生的重力侵蚀对岸库土地利用的威胁,进一步深入研究坝控区侵蚀方式对淤地坝拦泥量的影响对淤地坝的病险排除及水土资源高效利用具有重要的意义。

参考文献:

[1] Iván R D, Joaquín N H, Roberto S M, et al. Evaluating methods to quantify sediment volumes trapped behind check

dams,Saldana badlands(Spain) [J]. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(1): 1-11.

[2] Singh H V, Thompson A M, Gharabaghi B. Event runoff and sediment-yield neural network models for assessment and design of management practices for small agricultural watersheds [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2016, 22(2): 04016056.

[3] Wei Z L, Shang Y Q, Zhao Y, et al. Rainfall threshold for initiation of channelized debris flows in a small catchment based on in-site measurement [J]. Engineering Geology, 2017, 217: 23-34.

[4] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等. 岔巴沟淤地坝小流域重力侵蚀产沙量分析[J]. 水利学报,2017,48(2):241-245.

[5] 王兴奎,钱宁,胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程[J]. 水利学报,1982(7):26-35.

[6] 王光谦,薛海,李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型 [J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(4):335-344.

[7] 赵超,王书芳,徐向舟,等. 重力侵蚀黄土沟壑区沟坡产沙特性[J]. 农业工程学报,2012,28(12):140-145.

[8] 杨吉山,姚文艺,王玲玲. 黄土沟道重力侵蚀规律及机理研究[J]. 人民黄河,2014,36(6):93-96.

[9] 王兴奎,钱宁,胡维德. 黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程[J]. 水利学报,1982(7):26-35.

[10] 许炯心. 黄土高原丘陵沟壑区坡面一沟道系统中的高含沙水流(Ⅰ):地貌因素与重力侵蚀的影响[J]. 自然灾害学报,2004,13(1):55-60.

[11] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报,1966,32(1):20-36.

[12] 赵超,王书芳,徐向舟,等. 重力侵蚀黄土沟壑区沟坡产沙特性[J]. 农业工程学报,2012,28(12):140-145.

[13] 王光谦,薛海,李铁键. 黄土高原沟坡重力侵蚀的理论模型 [J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(4):335-344.

[14] 李铁键,王光谦,张成,等. 黄土沟壑区流域重力侵蚀模拟[J]. 天津大学学报,2008,41(9):1136-1141.

[15] 白玉琪,陈晓春. 浅析使用全站仪测量淤地坝的方法 [J]. 兰州文理学院学报,2016,30(5):118-120,125.

容重进行表达,参数  $a$  可通过形状比率和容重进行表达,参数  $n$  可通过容重和塑性指数表达。

表 5 理化性质影响残余含水率和拟合参数主导因子方程

| 主导因子方程                        | $R^2$   | $n$ |
|-------------------------------|---------|-----|
| $Y_1=0.003X_6-0.093X_2+0.309$ | 0.697** | 18  |
| $Y_2=5.639X_7-0.832X_2-2.162$ | 0.714** | 18  |
| $Y_3=0.347X_2-0.002X_3+0.613$ | 0.761** | 18  |

3 结论

(1)崩壁土壤塑性指数、黏粒含量、分形维数及磨圆度等随着土层深度的增加大致呈降低的趋势;崩壁土体颗粒主要为块状颗粒,且呈坚棱角状,形状比率为 0.61~0.69,磨圆度为 0.71~0.80,土壤深度越大,土壤颗粒形状越不规则。

(2)崩岗崩壁不同土层土体水分特征曲线差异较大,且表现出一定变化规律。随着崩壁土层深度的增加,曲线斜率逐渐增大,残余含水率逐渐减小,同时 VG 拟合参数  $a$  呈现出下降的趋势,参数  $n$  则呈现出增大的趋势。

(3)土壤理化性质对崩岗崩壁土体水分特征曲线影响较大,容重和磨圆度均与残余含水率、VG 拟合参数  $a$  和参数  $n$  相关性较高,土壤颗粒形态通过对土体孔隙状况的影响对崩壁土水分特征曲线的影响较大。此外,残余含水率与砂粒含量和黏粒含量等相关性较高,可用容重和黏粒含量表达;参数  $a$  与形状比率等相关性较高,可用容重和形状比率表达;参数  $n$  与塑性指数等相关性较高,可用容重和塑性指数表达。

参考文献:

[1] 张芳枝,梁志松,周秋娟.非饱和土性状及其边坡稳定性[M].北京:中国水利水电出版社,2011.

[2] Arezoo R. Effects of soil-water characteristic curve and relative permeability equations on estimation of unsaturated permeability function [J]. Soils & Foundations, 2015, 55(6): 1400-1411.

[3] Dastjerdi M H T, Habibagahi G, Nikooee E. Effect of cconfining stress on soil water retention curve and its impact on the shear strength of unsaturated soils [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(5): 5-11.

[4] Gallage C, Uchimura T. Direct shear testing on unsaturated silty soils to investigate the effects of drying and wetting on shear strength sarameters at low suction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(3): 04015081.

(上接第 112 页)

[16] 朱顺平,薛英.无反射棱镜全站仪及其测试[J].测绘通报,2001(3):41-42,45.

[17] 涂刚.无反射棱镜全站仪及其在工程测量中的应用[J].武汉勘察设计,2012(6):69-71.

[18] 张宁宁,刘普灵.黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵

[5] Fredlund M D, Fredlund D G, Wilson G W. Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties [C]// 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio De Janeiro, Brazil, 1997:13-23.

[6] 赵宝平,李晓云,郭建平,等.基于体积压力板仪及压力膜仪法的土水特征曲线研究[J].科技信息,2010,2(17):34-35.

[7] 祁昊,冯文凯,陈建峰,等.降雨作用下欢喜坡冰水堆积体角砾土强度特性[J].水文地质工程地质,2017,44(4):78-84.

[8] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.土水特征曲线在滑坡预测中的应用性探讨[J].岩石力学与工程学报,2009,28(12):2569-2576.

[9] 刘希林,连海清.崩岗侵蚀地貌分布的海拔高程与坡向选择性[J].水土保持通报,2011,31(4):32-36.

[10] 区晓琳,陈志彪,陈志强,等.闽西南崩岗土壤理化性质及可蚀性分异特征[J].中国水土保持科学,2016,14(3):84-92.

[11] Xia D, Deng Y S, Wang S L, et al. Fractal features of soil particle-size distribution of different weathering profiles of the collapsing gullies in the hilly granitic region, south China [J]. Natural Hazards, 2015, 79(1): 455-478.

[12] 江凌.崩壁土体水分入参与再分布特征实验研究[D].福州:福建农林大学,2015.

[13] 罗小艳,刘伟平,扶名福.颗粒级配及竖向应力对崩岗区土壤土水特征曲线的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(增刊 1):235-240.

[14] 夏金文,魏玉杰,蔡崇法.花岗岩风化土物理特征曲线间的相关性研究[J].土壤学报,2017,54(3):581-589.

[15] 蒋芳市.花岗岩崩岗崩积体侵蚀机理研究[D].福州:福建农林大学,2013.

[16] 杨培岭,罗远培.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[17] Lu N, Likos W J. Unsaturated soil mechanics [M]. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004: 211-212.

[18] 邓羽松,丁树文,刘辰明,等.鄂东南花岗岩崩岗崩壁土壤水分特征研究[J].水土保持学报,2015,29(4):132-137.

[19] 李志清,李涛,胡瑞林.非饱和土水分特征曲线特性[J].中国公路学报,2007,20(3):23-28.

[20] 陈东霞,龚晓南.非饱和残积土的土-水特征曲线试验及模拟[J].岩土力学,2014,35(7):1886-1889.

[21] 蒋明镜,吴迪,曹培,等.基于 SEM 图片的钙质砂连通孔隙分析[J].岩土工程学报,2017,39(增刊 1):1-5.

蚀环境演变的泥沙响应. [J]. 水土保持学报,2017,31(6):106-111,117.

[19] 陕西省水利科学研究所河渠研究室,清华大学水利工程系泥沙研究室.水库泥沙[M].北京:水利电力出版社,1979.