

岔巴沟流域不同淤积状态下淤地坝淤积深度研究

马力^{1,2}, 张秋芬^{1,2}, 倪用鑫^{1,2}, 李勉^{1,2}, 吕锡芝^{1,2}

(1.黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2.河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003)

摘要:为了进一步明确暴雨条件下淤地坝的拦沙作用,利用岔巴沟流域不同淤积状态淤地坝泥沙沉积信息,结合线性回归和相关分析等方法,研究了不同淤积状态下淤地坝淤积深度关系。结果表明:(1) 不同淤积状态淤地坝的最大淤积深度和平均淤积深度由高到低为堵塞坝(1.07 m, 0.62 m) > 水毁坝(0.72 m, 0.53 m) > 完好坝(0.70 m, 0.45 m) > 淤满坝(0.19 m, 0.15 m)。(2) 不同淤积状态下坝地淤积深度与降雨强度相关性拟合不明显;堵塞坝和水毁坝坝地淤积深度与 B 值(坝地面积与坝控流域面积之比)呈指数负相关,相关指数分别为 0.73, 0.71。(3) 不同淤积状态淤地坝平均拦沙模数由大到小依次为:堵塞坝(14 274 t/km²) > 完好坝(12 480 t/km²) > 水毁坝(11 725 t/km²) > 淤满坝(3 350 t/km²)。综上所述,暴雨条件下,堵塞坝具有高效的拦沙作用,但小库容坝地极易产生较大的淤积深度,从而对坝体产生威胁;堵塞坝和完好坝的合理配置是流域高效滞洪拦沙的关键。

关键词:淤地坝; 暴雨洪水; 不同淤积状态; 淤积深度; 岔巴沟

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)02-0018-05

Study on Siltation Depth in Warping Dam Under Different Silting Conditions in Chabagou Watershed

MA Li^{1,2}, ZHANG Qiufen^{1,2}, NI Yongxin^{1,2}, LI Mian^{1,2}, LÜ Xizhi^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Basin Ecological Environment Protection and Restoration in Henan Province, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: In order to further clarify the silt retention effect of warping dam under the condition of rainstorm, this study used the sediment deposition information of warping dam under different deposition states in Chabagou Basin to study the relationship between the deposition depth in warping dam under different deposition states by combining with the methods of linear regression and correlation analysis. The results show that: (1) the maximum and average siltation depth in warping dams under different siltation conditions decrease in the order: blocking dam (1.07 m, 0.62 m) > waterlogging dam (0.72 m, 0.53 m) > intact dam (0.70 m, 0.45 m) > full dam (0.19 m, 0.15 m); (2) there is no obvious correlation between the siltation depth and rainfall intensity under different siltation conditions; the siltation depth and B value (the ratio of dam field to dam-controlled watershed area) of blocking dam and waterlogging dam have an exponential negative correlation, and the correlation indexes are 0.73 and 0.71, respectively; (3) warping dam average moduli of intercepting sediment under different silting conditions decreased in the order: blocking dam (14 274 t/km²) > intact dam (12 480 t/km²) > waterlogging dam (11 725 t/km²) > full dam (3 350 t/km²). To sum up, under the condition of rainstorm, the blocking dam has the function of high-efficiency sediment retention, but the dam with small storage capacity is prone to produce a greater depth of sedimentation, which threatens the dam. The reasonable allocation of blocking dam and intact dam is the key to efficient flood detention and sediment retention.

Keywords: warping dam; rainstorm and flood; different silting conditions; siltation depth; Chabagou

收稿日期: 2021-02-22

修回日期: 2021-03-30

资助项目: 国家自然科学基金(51979118); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(HFY-JBYW-2019-01, HFY-JBYW-2019-12); 国家重点实验室基金(IWHR-SKL-KF201903)

第一作者: 马力(1987—), 男, 河南周口人, 工程师, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: hilary777@126.com

通信作者: 吕锡芝(1986—), 男, 山东惠民人, 高级工程师, 博士, 主要从事生态水文、水土保持研究。E-mail: nihulvxi zhi@163.com

目前,黄土高原地区水土保持作用有明显提高,但遭遇特大暴雨时仍会形成高含沙大洪水,引发重大灾情,严重威胁着下游人民的生产和生活安全^[1]。淤地坝具备高效的保持水土、蓄水拦沙功能,在黄土高原地区分布广泛^[2],在暴雨洪水过程中,淤地坝具有明显的削峰和滞洪作用^[3]。淤地坝在拦蓄泥沙的同时,也赋存了大量的侵蚀产沙信息,了解淤地坝泥沙沉积特征是坝地泥沙输移过程及规律研究的基础和前提^[4-6]。许多学者利用坝地泥沙养分^[5]、粒径^[6]、干容重^[7]、核素示踪等^[8]指标方法分析淤地坝沉积泥沙信息,研究流域暴雨洪水侵蚀量、侵蚀产沙速率、沉积泥沙来源等^[9-14]。淤地坝通常由坝体、排水设施或溢洪道构成,泥沙呈动态淤积状态,较难量测和计算,而闷葫芦坝由于无排水排沙出口,能够很好地揭示坝地的泥沙淤积深度和泥沙来源情况,是大部分学者关注的重点。相比之下,针对其他类型淤地坝泥沙淤积深度的研究则相对薄弱。然而通常情况下,流域内淤地坝类型分布多样,闷葫芦坝数量占比较少,单凭闷葫芦坝的研究结果难以准确反映小流域整体侵蚀产沙状态,分析不同淤积状态下的淤地坝淤积深度,有利于从多角度反映流域洪水过程泥沙输移状态,从而进一步揭示降雨对流域侵蚀的作用机理。因此,本研究以 2017 年“7·26”暴雨中心区域岔巴沟小流域为研究对象,通过对不同淤积状态下淤地坝内不同断面位置次洪水泥沙沉积层的量测,研究了次洪水条件下坝地泥沙沉积层淤积深度特征,为淤地坝泥沙沉积和输移过程的研究提供理论支撑。

1 研究区概况

岔巴沟(位于东经 109°47′,北纬 37°31′)是大理

河流域的一级支流、无定河流域二级支流,属于黄土丘陵沟壑区,流域面积 205 km²,沟道长 26.5 km,流域平均宽度 7.22 km,沟道密度 1.05 km/km²,流域出口水文站为曹坪水文站,控制流域面积为 187 km²。2017 年 7 月 25 日 20 时—26 日 8 时,陕北榆林地区无定河流域发生特大暴雨洪水,暴雨中心降雨量达 252.3 mm。本研究调查了暴雨中心岔巴沟流域的大、中、小型淤地坝共 148 座(其中骨干坝 31 座,中型坝 65 座,小型坝 52 座),选取有明显淤积的淤地坝 38 座,根据坝体排水排沙状态和是否具备放水工程等条件,将淤地坝分为 4 类:(1)淤满坝(3 座)。在暴雨洪水前已淤满,即超过拦泥库容的淤地坝;(2)水毁坝(7 座)。暴雨洪水过程中被侵蚀而产生垮塌或形成钻水洞的淤地坝;(3)完好坝(19 座)。工程完好,有放水设施(溢洪道、竖井等)且未被堵塞的淤地坝;(4)堵塞坝(9 座)。工程完好,无排水设施,或排水设施在洪水前被堵塞的淤地坝。淤地坝具体现状及分布情况见图 1 和图 2。

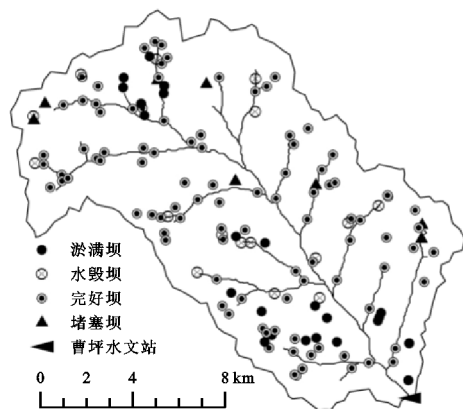


图 1 岔巴沟流域淤地坝类型分布



图 2 不同淤积状态淤地坝示意图

2 研究方法 with 数据来源

2.1 泥沙淤积体积及坝地面积计算

采用野外调查定位与卫星影像观测相结合,对流域内淤地坝分布进行排查并编号(坝号)。根据淤地坝内地形及汇水情况,分别对坝地主沟、支沟设置若干淤积断面,采用激光测距仪测量并记录断面长度,

分区块计算坝地淤积面积(区块合并后的面积称为坝地面积)。每个断面人工开挖 3 个探坑,将暴雨洪水形成的沉积旋回深度作为“7·26”洪水形成的泥沙沉积厚度。淤地坝的泥沙淤积体积 V 计算公式为:

$$V = \sum_{i=1}^n S_i h_i \quad (1)$$

$$h_i = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 r_j \quad (2)$$

式中: S_i 为所调查淤地坝坝地相邻两个断面之间的淤积面积(m^2); h_i 为第 i 个断面的平均淤积厚度(m); n 为断面个数; r_j 为第 j 个探坑的淤积厚度(m)。

坝地面积与流域坝控面积之比(以下简称 B 值)的计算公式为:

$$B=b/S$$

(3)

式中: b 为淤地坝单坝的坝地面积; S 为淤地坝单坝的坝控流域面积。

2.2 拦沙模数计算

将淤地坝坝址的 GPS 地理坐标转换到具有大地坐标系的地图上, 利用 ArcMap 空间分析工具, 将坝址作为倾泻点, 计算出坝控流域面积。将每座淤地坝泥沙淤积量平摊到该淤地坝的坝控面积上, 得到单坝拦沙模数^[15]。计算公式为:

$$M_Y=1.30Y/A$$

(4)

式中: M_Y 为单坝拦沙模数(t/km^2); Y 为淤积体积(m^3); A 为坝控面积(km^2); 1.30 为土壤容重(g/cm^3)。

2.3 雨强数据

降雨数据来源于《中华人民共和国水文年鉴》^[16], 其中岔巴沟流域包含 12 个雨量站和 1 个水文站, 最小降雨时段数据为 2 h, 坝控流域雨强根据雨量站 2 h 最大降雨量, 利用 GIS 空间分析工具进行反距离加权插值计算获得。

3 结果与分析

3.1 坝地淤积深度对比关系

岔巴沟流域不同淤积状态下淤地坝坝地淤积深度差异较为明显(图 3)。单坝最大淤积深度范围 0.15~2.00 m, 平均淤积深度范围 0.11~1.46 m, 其中淤满坝、水毁坝、完好坝、堵塞坝的最大淤积深度范围分别为 0.15~0.22 m, 0.50~1.00 m, 0.28~1.15 m,

0.80~2.00 m, 平均淤积深度范围分别为 0.11~0.21 m, 0.16~0.83 m, 0.19~0.79 m, 0.22~1.46 m; 除淤满坝外, 不同淤积状态下的坝地最大及平均淤积深度差异显著, 其中完好坝的最大淤积深度最大值是最小值的 4.11 倍, 堵塞坝的平均淤积深度最大值是最小值的 6.64 倍; 不同淤积类状态下最大淤积深度均值和平均淤积深度均值由高到低分别为: 堵塞坝(1.07 m, 0.62 m)>水毁坝(0.72 m, 0.53 m)>完好坝(0.70 m, 0.45 m)>淤满坝(0.19 m, 0.15 m), 堵塞坝坝地淤积深度普遍高于其他淤积状态淤地坝; 不同淤积状态坝地最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度为堵塞坝(72.58%)>完好坝(55.56%)>水毁坝(35.85%)>淤满坝(26.67%), 堵塞坝和完好坝的最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度明显高于水毁坝和淤满坝。

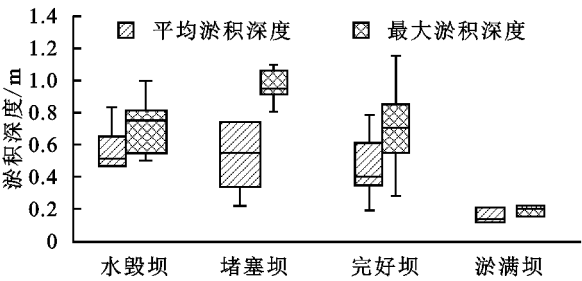


图 3 不同淤积状态淤地坝淤积深度

3.2 坝地淤积深度与雨强关系

不同淤积状态下淤地坝淤积深度与雨强关系表现有所差异(图 4)。单坝坝控流域场次 2 h 最大降雨量范围 50.65~85.84 mm, 多坝平均为 64.17 mm。不同淤积状态淤地坝中, 淤满坝淤积深度变化不大, 其他 3 种淤积状态坝地淤积深度与降雨强度关系表现为: 堵塞坝、水毁坝和完好坝的坝地淤积深度与降雨强度相关性拟合均不明显。

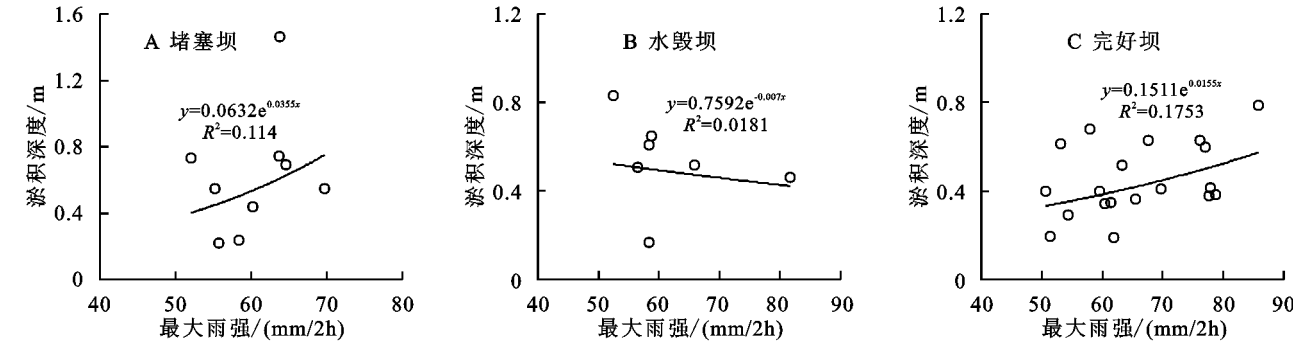


图 4 坝地平均淤积深度和最大雨强关系

3.3 坝地淤积深度与 B 值关系

首先对不同淤积状态坝地平均淤积深度分别与坝地面积、坝控流域面积相关性拟合分析, 结果均不明显; 之后对坝地平均淤积深度与 B 值相关性拟合

分析, 淤地坝的 B 值范围为 0.28%~5.28%, 单坝均值为 2.09%, 不同淤积状态坝地平均淤积深度与 B 值大体呈相反趋势(图 5)。由于淤满坝淤积深度变化不大, 其他 3 种淤积状态坝地淤积深度与 B 值关

系表现为: 堵塞坝和水毁坝坝地淤积深度与 B 值呈负指数相关, 相关指数分别为 0.73, 0.71, 坝地平均淤积深度随着淤地坝的 B 值减小而升高。完好坝的坝地淤积深度与 B 值相关性拟合不明显。

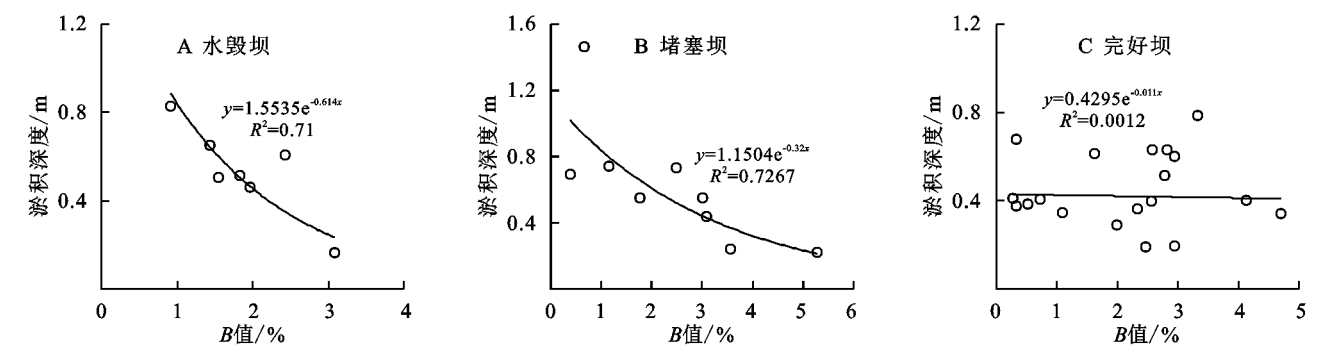


图 5 坝地平均淤积深度与 B 值关系

3.4 拦沙模数分布

岔巴沟流域不同淤积状态下淤地坝拦沙模数差异较大(图 6), 其中最大模数在 30 000 t/km² 以上, 最小仅为 986 t/km²。分段统计显示, 拦沙模数为 5 000 t/km² 以下的淤地坝有 9 座, 5 000~10 000 t/km² 的淤地坝有 6 座, 10 000~20 000 t/km² 的淤地坝有 15 座, 20 000 t/km² 以上的淤地坝有 8 座。不同淤积状态淤地坝平均拦沙模数由大到小依次为: 堵塞坝(14 274 t/km²)>完好坝(12 480 t/km²)>水毁坝(11 725 t/km²)>淤满坝(3 350 t/km²)。

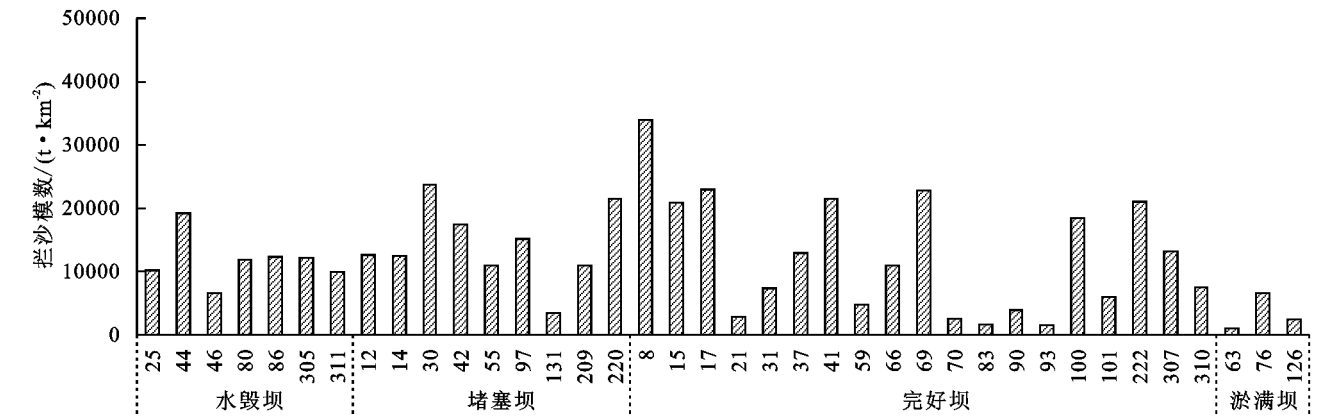


图 6 单坝坝控流域拦沙模数分布

4 讨论

4.1 坝地拦沙作用分析

黄土丘陵沟壑区沟道输送泥沙的能力特别强, 沟道中修建淤地坝后, 有巨大的拦沙效果, 当出现暴雨洪水时, 水流可直抵坝前, 受坝体的拦阻其挟带的泥沙将沉积在库内, 使沟道很快淤成平地, 淤地坝一定程度上是高含沙水流作用的产物^[17]。有研究表明, 淤地坝拦沙功能的实现主要依靠库容, 淤地坝拦沙量一般大于或等于相应的入黄泥沙减少量^[18-19]。本研究发现, 暴雨洪水过程中, 由于能够对大部分洪水泥沙进行拦截, 堵塞坝淤积深度均值最高, 拦水拦沙能力最为显著; 在坝体溃决前, 水毁坝排水不畅, 淤积状态与堵塞坝相似, 随着洪水过程加剧, 坝体的拦沙能力呈现不足而产生水毁溃坝现象, 现场调查的大部分坝地淤积状态显示, 水毁坝淤积深度普遍较高, 且在溃决后流出的泥沙量较小, 说明坝体溃决时间位于洪水过程末期, 即泥沙淤积到一定程度后坝体才发生水毁现象; 完好坝的淤积深度根据其不同排水形式及出水口高程等特点而不同; 淤满坝在洪水过程中仍有一定的拦沙能力, 与相关研究结果一致^[18]。综上可知, 不同淤积状态下淤地坝都具备有效拦截洪水泥沙的能力, 具体拦沙效率因其库容和排水形式有所差异。

最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度能够体现坝地淤积泥沙沉积层起伏度的变化, 产水产沙量较大时, 淤积层厚度大, 地形起伏差异也大, 产水产沙量较小时, 淤积厚度和地形起伏差异减小^[6]。本研究结果显示, 堵塞坝坝地淤积深度均值最高, 且最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度最大, 说明坝地淤深起伏度最大, 而淤满坝淤深起伏度最小。完好坝淤积深度均值低于水毁坝, 最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度高于水毁坝, 可能是由于完好坝泄洪设施(溢洪道、卧管或竖井等)不同而导致淤积的起伏度有所差异, 需结合坝地淤积断

面深度、泄洪设施高程等进一步分析研究。总体来看,堵塞坝和水毁坝具有高效的拦沙作用,在无泄洪的情况下,大多数坝体的稳定性无法保证;完好坝在一定程度上能够进行泥沙拦截,淤地坝建设的关键是平衡泥沙拦截作用和坝体稳定性两者的关系。

4.2 坝地淤积深度影响因素分析

降雨是淤地坝侵蚀产沙的主要驱动因子,流域产沙与降雨密切相关。有研究表明,淤地坝在汛期的拦沙作用最为明显,黄河中游地区不同空间尺度流域的淤地坝拦沙量与减蚀量均呈正比关系^[20]。降雨量和坝控流域面积相近的情况下,淤地坝的坝地面积越小,淤积库容相对越小,泥沙的淤积深度就会越高,从而对坝体的稳定性产生较高的威胁^[21]。本研究结果显示,暴雨条件下,堵塞坝的坝地平均淤积深度与降雨强度相关性拟合不明显;堵塞坝和水毁坝的 B 值能够显著影响坝地淤积深度, B 值越小,坝地平均淤积深度越高。可见,降雨强度对淤积深度并无直接影响关系,但暴雨条件下的小库容坝地极易产生较大的淤积深度,对坝体稳定性产生威胁, B 值可作为分析暴雨条件下坝地淤积深度的重要影响因子。

坝地淤积深度在一定程度上能够侧面反映坝控流域坝地的拦沙模数,本研究中堵塞坝的淤积深度和拦沙模数均高于其他类型淤地坝。但影响坝地淤积深度的因素较多,比如坝控小流域内部地形、土地利用、植被、水土保持措施等均能够影响降雨条件下坝控流域的泥沙淤积量,进而影响坝地淤积深度,总体考虑坝控流域的下垫面条件才能够更好阐述降雨对流域的侵蚀产沙机制。

5 结论

(1) 场次暴雨下,不同淤积状态淤地坝的最大淤积深度和平均淤积深度由高到低为:堵塞坝(1.07 m, 0.62 m) > 水毁坝(0.72 m, 0.53 m) > 完好坝(0.70 m, 0.45 m) > 淤满坝(0.19 m, 0.15 m);坝地最大淤积深度均值与平均淤积深度均值相差幅度为:堵塞坝(72.58%) > 完好坝(55.56%) > 水毁坝(35.85%) > 淤满坝(26.67%)。

(2) 不同淤积状态下坝地淤积深度与降雨强度相关性不明显;堵塞坝和水毁坝坝地淤积深度与 B 值呈指数负相关,相关指数分别为 0.73, 0.71。

(3) 淤地坝坝控区拦沙模数为 1 000 ~ 35 000 t/km²,不同淤积状态下淤地坝拦沙模数差异显著。不同淤积状态淤地坝平均拦沙模数由大到小依次为:

堵塞坝(14 274 t/km²) > 完好坝(12 480 t/km²) > 水毁坝(11 725 t/km²) > 淤满坝(3 350 t/km²)。

本文主要对不同淤积状态下淤地坝的淤积深度的规律及其相关性因素进行研究,要更好地了解坝地泥沙沉积过程及泥沙沉积规律,还需要更多的对比性研究,比如开展不同下垫面条件(土地利用、地貌植被等)流域淤地坝淤积规律对比分析等。

参考文献:

- [1] 王道席,侯素珍,杨吉山,等.无定河“7·26”暴雨洪水泥沙来源分析[J].人民黄河,2017,39(12):18-21.
- [2] 罗西超.黄土高原淤地坝建设现状及其发展思路[J].中国水土保持,2016(9):24-25.
- [3] 段金晓.淤地坝不同淤积程度对水动力过程影响模拟研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [4] 李勉,姚文艺,史学建.淤地坝拦沙减蚀作用与泥沙沉积特征研究[J].水土保持研究,2005,12(5):111-115.
- [5] 张凤宝,薛凯,杨明义,等.坝地沉积旋回泥沙养分变化及其对小流域泥沙来源的解释[J].农业工程学报,2012,28(20):143-149.
- [6] 李勉,杨二,李平,等.黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J].农业工程学报,2017,33(3):161-167.
- [7] 李勋贵,李占斌,魏霞,等.黄土高原淤地坝坝地淤积物两个重要物理特性指标研究[J].水土保持研究,2007,14(2):218-220.
- [8] Zhang X B, Walling D E, Quine T A, et al. Use of reservoir deposits and Caesium-137 measurements to investigate the erosional response of a small drainage basin in the rolling loess plateau region of China[J]. Land Degradation & Development, 1997,8(1):1-16.
- [9] 文安邦,张信宝,沃林 DE.黄土丘陵区小流域泥沙来源及其动态变化的¹³⁷Cs 法研究[J].地理学报,1998,53(S):124-133.
- [10] 李勉,杨剑锋,侯建才,等.黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J].农业工程学报,2008,24(2):64-69.
- [11] 薛凯,杨明义,张凤宝,等.利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J].核农学报,2011,25(1):115-120.
- [12] Zhao Guangju, Klik Andreas, Mu Xingmin, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J]. Geomorphology, 2015,241:343-352.
- [13] Li Y, Poesen J, Yang J C, et al. Evaluating gully erosion using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb/¹³⁷Cs ratio in a reservoir catchment[J]. Soil & Tillage Research, 2004,69(1/2):107-115.
- [14] 魏霞,李占斌,沈冰,等.陕北子洲县典型淤地坝淤积过程和降雨关系的研究[J].农业工程学报,2006,22(9):80-84.

- [14] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [15] Shirazi M A, Hart J W, Boersma L. A Unifying quantitative analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(1): 181-190.
- [16] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113.
- [17] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1590-1599.
- [18] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 152-157.
- [19] 夏彬, 朱世硕, 郝旺林, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 175-181.
- [20] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81.
- [21] 魏慧, 赵文武. 土壤可蚀性 K 值最优估算方法遴选: 以陕北安塞集水区为例[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 52-65.
- [22] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007(1): 7-13.
- [23] 苏正安, 李艳, 熊东红, 等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 118-124.
- [24] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [25] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [26] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [27] Caron J, Espindola C R, Angers D A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 901-908.
- [28] Capriel P, Beck T, Borchert H, et al. Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(2): 415-415.
- [29] Tisdall J M, Smith S E, Rengasamy P. Aggregation of soil by fungal hyphae[J]. Soil Research, 1997, 35(1): 55-60.
- [30] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.

(上接第 17 页)

- [22] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [23] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 等. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用: 以云南松分布模拟为例[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659.
- [24] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1240-1247.
- [25] 姚华荣, 崔保山. 澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1362-1371.
- [26] 丁杰, 杨新兵, 朱辰光, 等. 崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 73-80.
- [27] 李宗勋, 李启艳, 侯晓龙, 等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 27-33, 40.
- [28] Ochoa P A, Fries A, Mejía D, et al. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes[J]. Catena, 2016, 140: 31-42.

(上接第 22 页)

- [15] 史学建, 王玲玲, 杨吉山, 等. 基于淤地坝沉积信息的流域土壤侵蚀模数估算[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 103-106.
- [16] 水利部黄河水利委员会. 中华人民共和国水文年鉴: 黄河流域水文资料(2017 年第 4 卷)[Z]. 北京: 水利部黄河水利委员会, 2018.
- [17] 方学敏, 万兆惠, 匡尚富. 黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J]. 水利学报, 1998(10): 50-54.
- [18] 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.
- [19] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 73-79.
- [20] 冉大川, 李占斌, 申震洲, 等. 泾河流域淤地坝拦沙对降雨的响应分析[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(3): 249-254.
- [21] 方学敏, 曾茂林. 黄河中游淤地坝坝系相对稳定研究[J]. 泥沙研究, 1996(3): 12-20.