

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

魏艳红^{1,2}, 焦菊英^{2,3}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000; 2.中国科学院水利部水土保持研究所,
陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为进一步优化和合理配置水土保持措施,以黄土丘陵沟壑区 3 个不同土地利用方式下的坝控小流域为例,基于人工探槽取样、淤积层次甄别及与产流降雨事件的对应关系,结合 1 : 10 000 早期地形图与全站仪测量,拟合库容曲线来估算淤地坝泥沙淤积量,进而反演坝控流域的产沙模数变化特征。结果表明:(1)延河马家沟 3 个不同土地利用方式下的洞儿沟、阎桥和芦渠坝控小流域,自建坝至 2016 年的多年平均淤积量分别为 2 748.80, 4 634.31, 3 141.17 t;(2)洞儿沟、阎桥和芦渠流域多年平均产沙模数分别为 2 432.56, 3 131.29, 1 794.95 t/(km² · a),依次属于轻度、中度和轻度侵蚀;不同土地利用方式下坝控小流域的最小产沙降雨量均>20 mm 以上;(3)不同的土地利用方式对小流域侵蚀产沙影响显著,人类活动明显的阎桥流域多年平均产沙模数大于以林草地为主的洞儿沟流域,而以林地和梯田为主的芦渠流域多年平均产沙模数最小。由此可见,在黄土丘陵沟壑区合理配置不同的水土保持措施,是减少小流域侵蚀产沙的有效途径。

关键词:淤地坝;产沙模数;土地利用方式;土壤侵蚀;黄土丘陵沟壑区

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)03-0096-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.014

Characteristics of Erosion and Sediment Yield in Small Watersheds Under Different Land Use Patterns in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau in China

WEI Yanhong^{1,2}, JIAO Juying^{2,3}

(1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling,

Shaanxi 712100; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: For further optimization and rational allocation of soil and water conservation measures, three small watersheds under different land use patterns in loess hilly and gully region was taken as an example. According to the sedimentation profile sampling, siltation layer identification and corresponding relationship with erosive rainfall events, the capacity curve of the check-dams was established combined with 1 : 10 000 early topographic map and Total Station measurement to estimate the sediment deposition, and then the sediment yield was determined based on the controlled watershed area and performance period. The results showed that: (1) The multi-year average sediment depositions in Dongergou, Yanqiao and Luqu dam-controlled small watersheds under different land use patterns from dam construction to 2016 in the Majiagou catchment of Yanhe River basin were 2 748.80, 4 634.31 and 3 141.17 t, respectively. (2) The multi-year average sediment yields of Dongergou, Yanqiao and Luqu watersheds were 2 432.56, 3 131.29 and 1 794.95 t/(km² · a), which were mild erosion, moderate erosion and mild erosion, respectively. The minimum rainfall of erosion and sediment yield in the dam-controlled small watershed under different land use patterns was greater than 20 mm. (3) Different land use patterns had significant effects on the erosion and sediment yield

收稿日期:2020-10-28

资助项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0501604);国家自然科学基金项目(41807073);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(29Y929681);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放基金项目(KLDD-2019-005);甘肃省科技计划自然科学基金项目(20JR5RA546)

第一作者:魏艳红(1988—),女,助理研究员,博士,主要从事流域土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:weiyh@lzb.ac.cn

通信作者:焦菊英(1965—),女,研究员,博士,博士生导师,主要从事流域侵蚀产沙、土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

in small watersheds. The multi-year average sediment yield of Yanqiao watershed with obvious human activities was larger than that of Dongergou watershed with lots of forest and grassland, while the multi-year average sediment yield in Luqu watershed was the smallest with mainly forest and terraces. Thus, it could be concluded that the reasonable configuration of different water and soil conservation measures in loess hilly and gully region is an effective way to reduce erosion and sediment yield in small watersheds.

Keywords: check-dams; sediment yield; land use patterns; soil erosion; loess hilly and gully region

黄土高原是我国水土流失最严重的地区,有超过 60%的土地存在着不同程度的水土流失^[1]。而黄土丘陵沟壑区作为黄土高原土壤侵蚀最严重的区域,也是黄河粗泥沙的主要来源地^[2]。该区自然条件复杂,生态环境脆弱,土壤侵蚀模数在 2 500~15 000 t/(km²·a),严重地区甚至高达 20 000 t/(km²·a)以上^[3]。大范围的水土流失导致黄河下游河床淤积抬升,洪涝灾害频发,时刻威胁着中下游地区人民群众的生命财产安全^[4]。自上世纪 50 年代以来,国家先后实施了坡面治理、坡面和沟谷联合治理、小流域综合治理和退耕还林还草工程等一系列水土保持治理措施,在土壤侵蚀控制和生态建设等方面成效显著,使得入黄泥沙快速减少^[5-6]。长期的水土流失治理实践证明,淤地坝是快速减少入黄粗泥沙的有效手段,同时也是记录小流域侵蚀产沙信息与历史过程的重要载体^[7-9]。自新中国成立以来,淤地坝在黄土高原地区进行了大范围的推广和应用,截止 2011 年共建成淤地坝 58 446 座,淤地面积 927.6 km²,其中治沟骨干工程 5 655 座,总库容 57.0 亿 m³^[10]。

小流域作为土壤侵蚀发生和水土保持综合治理的基本单元,是一个囊括各种土壤侵蚀方式和侵蚀类型的完整体系,确定其侵蚀产沙模数对于合理布局各种水土保持措施和控制土壤侵蚀的发生至关重要^[11-12]。已有研究^[13]表明,小流域的侵蚀产沙过程是降雨与流域下垫面相互作用的结果,降雨是土壤侵蚀发生的主要动力,而植被是抑制土壤侵蚀的积极因素,二者的组合关系决定着小流域的侵蚀产沙特征。其中,植被作为影响水土流失的最活跃因子,受人类活动对土地利用方式的影响极大^[14]。不合理的人类活动导致不合理的土地利用,而不同的土地利用方式则通过改变地形条件、土壤性质和植被覆盖等

因素影响土壤侵蚀的发生与发展^[15]。在不同的土地利用情况下,土壤侵蚀强度差异悬殊,当地表植被遭到破坏时,将导致水土流失加剧^[16]。因此,本研究以不同土地利用方式下的典型坝控小流域为对象,根据淤地坝运营期间的产流降雨事件与泥沙淤积层次的对应关系,分析不同尺度下的产沙模数变化特征以及小流域产沙与降雨、下垫面条件之间的关系,以期为进一步评估土壤流失状况和优化配置水土保持措施提供科学依据。

1 研究区概况

马家沟流域地处陕西省延安市安塞区境内,是延河流域一级支流,属于典型的黄土丘陵沟壑区。该流域总面积 73.8 km²,主沟道长 17.5 km,沟道平均比降 6.5‰,沟壑密度 4.5 km/km²。该流域处于暖温带半干旱大陆性季风气候区,年均气温 6~11℃,年均降水量 400 mm,大约 80%的降雨集中在 6—9 月。流域主要土壤类型为黄绵土,第三纪红土在流域沟谷坡脚处零星出露。该流域位于森林草原植被带,在广大梁峁坡顶部及阳坡等分布着草本植物,而在阴坡、沟坡底部水分比较集中的地方分布着乔木或灌木^[17]。流域内梁峁起伏不平,沟壑纵横交错,地表支离破碎,水土流失面积 72.3 km²,占全流域总面积的 98%,1999 年以前土壤侵蚀模数曾高达 8 740 t/(km²·a)^[18]。退耕还林(草)政策实施以来,经过近 10 年的植被恢复与综合治理,至 2008 年马家沟流域年土壤侵蚀模数降到 5 700 t/(km²·a)^[19]。

本研究选取延河马家沟流域内 3 个淤地坝控制的不同土地利用类型的小流域,分别是洞儿沟(林地、草地)、阎桥(林地、草地、建设用地、耕地、果园和道路)和芦渠(梯田、林地、草地)流域,详见表 1 和图 1。

表 1 延河马家沟流域 3 座淤地坝基本信息

坝名	坝型	经度(E)	纬度(N)	运行年份	淤积年限/a	坝控面积/km ²
洞儿沟	小型坝	109°17′14.53″	36°51′25.84″	2004—2016	13	1.13
阎桥	小型坝	109°16′53.04″	36°51′20.13″	2006—2016	11	1.48
芦渠	小型坝	109°15′12.55″	36°52′52.36″	2008—2016	9	1.75

2 材料与方法

2.1 样品采集与分析

2014 年 4 月,在延河马家沟流域的洞儿沟、阎桥和芦渠 3 座淤地坝内进行人工探槽取样,剖面深度在

1.48~2.23 m,将采样剖面详细划分淤积层次。

同时,采集泥沙淤积样品,主要采样间距为 5 cm,较薄淤积层次采样间距适当缩小。将所有样品经室内自然风干后,剔除石块、杂草及根系,过 2 mm

筛备用。采用英国马尔文激光粒度分析仪 Mastersizer 2000 对淤地坝剖面样品进行粒度分析,粒径范围是 0~2 mm。根据国际制泥沙粒径分级标准: <0.002 mm 为黏粒,0.002~0.02 mm 为粉粒,0.02~2

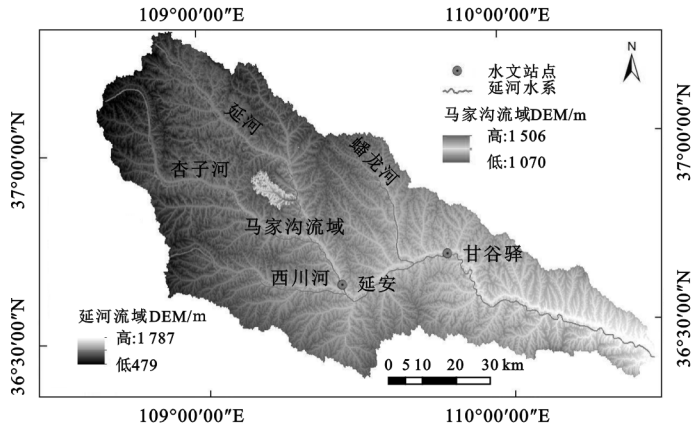


图 1 延河马家沟流域 3 个典型坝控小流域位置

2.2 淤地坝库容曲线拟合

将坝控范围内的 1 : 10 000 地形图进行扫描,扫描后的地形图按照 1 : 1 比例置于 AutoCAD 中矢量化,标注每条等高线,在矢量化结束时让其闭合于坝体所在处的直线上,然后使用 AREA 命令,得到不同高程处等高线所围成的面积。将每 2 根等高线之间的形状简化为圆台状,计算累积库容并以高程作为横坐标拟合库容曲线,延河马家沟流域 3 座淤地坝的库容曲线见图 2。

圆台体体积计算公式为:

$$V=\frac{(A+A'+\sqrt{A \times A'}) \times h}{3} \tag{1}$$

式中: V 为圆台体体积(m^3); A 为圆台体上底面积(m^2); A' 为圆台体下底面积(m^2),上底面积和下底面积是指相邻两条等高线所围成的面积(m^2); h 为圆台体的高度(m),指 2 根等高线之间的高程差^[20]。

2.3 淤地坝淤积量估算与动态监测

2015 年 4 月,应用全站仪(LEICA)根据水准点高程引点测量了延河马家沟流域的 3 座淤地坝(洞儿沟、阎桥和芦渠),分别测得 36,39,82 个碎步点,最终得到各个小流域坝地淤积面的平均高程和淤积面积。根据全站仪测量获得的平均高程可计算淤地坝自建坝以来的淤积总量,而通过人工探槽得到的各沉积旋回层实测厚度可计算旋回层淤积量。基于淤地坝库容曲线、土壤容重、淤积面平均高程及各沉积旋回层实测厚度,得到旋回层泥沙淤积量及淤地坝泥沙淤积总量,计算公式为:

$$D_x=V_x \times \rho_x \quad x=1,2,\cdots,n \tag{2}$$

$$D=\sum_{x=1}^n D_x \tag{3}$$

式中: V_x 为第 x 沉积旋回层体积(m^3); ρ_x 为第 x 沉

mm 为砂粒,用于建立淤积层次与产流降雨事件的对应关系。另外,应用环刀法测定样品的土壤容重,用于计算沉积剖面旋回层泥沙淤积量及淤地坝泥沙淤积总量。



图 2 延河马家沟流域 3 座淤地坝库容曲线

通过在淤地坝淤积范围的不同部位布设监测标尺,可获取 2015 年以后坝内的泥沙淤积厚度,用以补充和完善数据序列。根据人工探槽能够得到淤地坝早期沉积旋回层的泥沙淤积量,而监测标尺则能够获取淤地坝当年的淤积厚度与淤积量。监测标尺布设在马家沟流域的阎桥、芦渠和大狼牙刺崩流域(图 1)。2015 年初,洞儿沟流域在坝地内开采石山,导致流域内植被破坏,坝地被毁。因此,选择同样以林草地为主的大狼牙刺崩流域来替代监测,并按比例换算到洞儿沟流域。

2.4 淤积层次与产流降雨事件的对应关系

根据采样剖面淤积层次划分、泥沙粒度及与产沙降雨量的对应关系,得到延河马家沟流域各个淤地坝淤积层次的确切时间及旋回层淤积量见图 3。通过人工探槽计算得到 3 座淤地坝截至 2014 年的旋回层淤积量及淤积总量,而监测标尺测得的淤积厚度只能获取 2015—2016 年的淤积总量。

2.5 坝控流域产沙模数的反演

由于延河马家沟流域内的 3 座淤地坝是只有坝

体而没有排洪输水设施的“闷葫芦”坝,因此当侵蚀性降雨产生的泥沙通过地表径流被拦蓄沉积在淤地坝内时,能够流出流域的泥沙量很少。那么,淤地坝内的泥沙淤积量约等于小流域的侵蚀产沙量,通过旋回层厚度和流域面积可计算次降雨条件下的产沙模数。本文基于典型淤地坝的泥沙淤积量,根据淤地坝作用年限和坝控面积,反演不同土地利用方式下的坝控小流域自建坝以来的产沙模数变化序列。

3 结果与分析

3.1 淤地坝淤积总量及旋回层淤积量

基于库容曲线及淤积面平均高程,根据公式(3)计算得到延河马家沟洞儿沟、阎桥和芦渠流域自建坝至 2016 年以来的泥沙淤积总量,分别为 35 734.35, 50 977.40, 28 270.49 t, 多年平均淤积量分别为 2 748.80, 4 634.31, 3 141.17 t。

延河马家沟流域不同土地利用方式下淤地坝旋回层淤积量变化见图 3d, 洞儿沟流域共有 5 个旋回层, 淤积量在 225.35~8 527.00 t, 平均淤积量为 3 376.84 t; 阎桥流域共有旋回层 13 个, 其淤积量在 425.25~4 207.86 t 变化, 平均值为 1 843.44 t; 芦渠流域共有 12 个旋回层, 淤积量在 499.12~6 989.96 t, 平均值为 2 020.44 t。

通过旋回层淤积量及标尺监测数据得到延河马家沟流域各淤地坝的年淤积量, 其中洞儿沟流域 2013—2016 年的年淤积量在 0~16 304.58 t, 阎桥流域 2009—2016 年在 150.22~10 121.94 t, 芦渠流域 2013—2016 年在 149.82~21 088.50 t(图 4)。延河马家沟 3 个不同土地利用方式下的坝控小流域均在 2013 年出现最大的年淤积量, 其中芦渠流域由于大量梯田边坡损毁严重, 2013 年的年淤积量高达 21 088.50 t。通过分析标尺监测数据可知, 在近 2 年人类活动明显的阎桥流域和以梯田为主的芦渠流域有泥沙淤积, 而以林草为主的洞儿沟流域基本未淤积。

3.2 坝控流域次产沙模数变化特征

延河马家沟洞儿沟、阎桥和芦渠流域分别对应着 5, 13, 12 次径流产沙事件, 平均次产沙模数分别为 2 988.36, 1 245.57, 1 154.54 t/km²。根据土壤侵蚀分类分级标准(SL 190—2007)^[21], 其中微度侵蚀(<1 000 t/km²)对应的径流产沙事件分别是 2, 7, 7 次, 轻度侵蚀(1 000~2 500 t/km²)分别是 1, 5, 4 次, 中度侵蚀(2 500~5 000 t/km²)分别是 1, 1, 1 次, 强烈侵蚀(5 000~8 000 t/km²)分别是 1, 0, 0 次。最大的次产沙模数分别为 7 546.02, 2 843.15, 3 994.26 t/km², 属于中度以上侵蚀, 均出现在 2013 年 7 月 12 日, 对应的次产沙降雨量均为 100.0 mm; 而最小的次产沙模数分别为 199.43, 287.33, 285.21

t/km², 属于微度侵蚀, 对应的次产沙降雨量分别为 57.5, 33.5, 46.0 mm(图 5)。

3.3 坝控流域年产沙模数变化特征

延河马家沟洞儿沟流域在 2013—2016 年的年产沙模数变化呈逐年减小趋势, 多年平均产沙模数为 3 753.41 t/(km²·a), 属于中度侵蚀; 最大的年产沙模数 14 428.83 t/km² 出现在 2013 年, 属于极强烈侵蚀, 对应的年产沙降雨量为 239.0 mm。阎桥流域在 2009—2016 年间的年产沙模数变化是先增加后减小, 多年平均产沙模数为 2 091.42 t/(km²·a), 属于轻度侵蚀; 最大、最小的年产沙模数为 101.50, 6 839.15 t/km² 分别出现在 2013 年和 2015 年, 依次属于微度侵蚀和强烈侵蚀, 对应的年产沙降雨量分别为 239.0, 169.3 mm。芦渠流域在 2013—2016 年的年产沙模数变化是逐年减小趋势, 多年平均产沙模数为 3 511.13 t/(km²·a), 属于中度侵蚀; 最大的年产沙模数 12 050.57 t/km² 出现在 2013 年, 属于极强烈侵蚀, 对应的年产沙降雨量为 436.1 mm(图 6)。

3.4 小流域产沙与降雨、下垫面条件之间的关系

由于不同土地利用方式下坝控小流域内的下垫面特征不同, 因此流域内的最小产沙降雨量也存在着差异。在延河马家沟流域, 3 个不同土地利用方式下淤地坝控制流域的最小产沙降雨量均大于 20 mm 以上(表 2)。由图 7 可知, 延河马家沟不同土地利用方式下的洞儿沟、阎桥和芦渠坝控小流域的次产沙模数与次产沙降雨量之间呈显著相关关系($P<0.05$), R^2 值分别为 0.80, 0.63, 0.60。

表 2 为延河马家沟 3 个小流域各土地利用类型面积与分布情况、流域泥沙淤积总量与产沙模数的变化, 其中洞儿沟流域土地利用类型主要以林草地为主, 占流域总面积的 82.5%, 自建坝至 2016 年的多年平均产沙模数为 2 432.56 t/(km²·a), 属于轻度侵蚀; 阎桥流域土地利用类型主要以林地、草地和耕地为主, 占到流域总面积的 93.7%, 其他为住宅用地, 占 6.3%, 自建坝至 2016 年的多年平均产沙模数为 3 131.29 t/(km²·a), 属于中度侵蚀; 芦渠流域土地利用类型主要以林地、耕地为主, 占流域总面积的 88.4%, 其中耕地主要是梯田, 自建坝至 2016 年的多年平均产沙模数为 1 794.95 t/(km²·a), 属于轻度侵蚀。综上可知, 延河马家沟流域 3 个不同土地利用方式下的坝控小流域多年平均产沙模数变化, 是人类活动明显阎桥流域大于以林草地为主的洞儿沟流域, 而以林地和梯田为主的芦渠流域多年平均产沙模数最小。2013 年的极端暴雨条件下, 延河马家沟洞儿沟、阎桥和芦渠 3 个坝控小流域的产沙模数在 6 839.15~14 428.83 t/km², 属于强烈以上侵蚀。

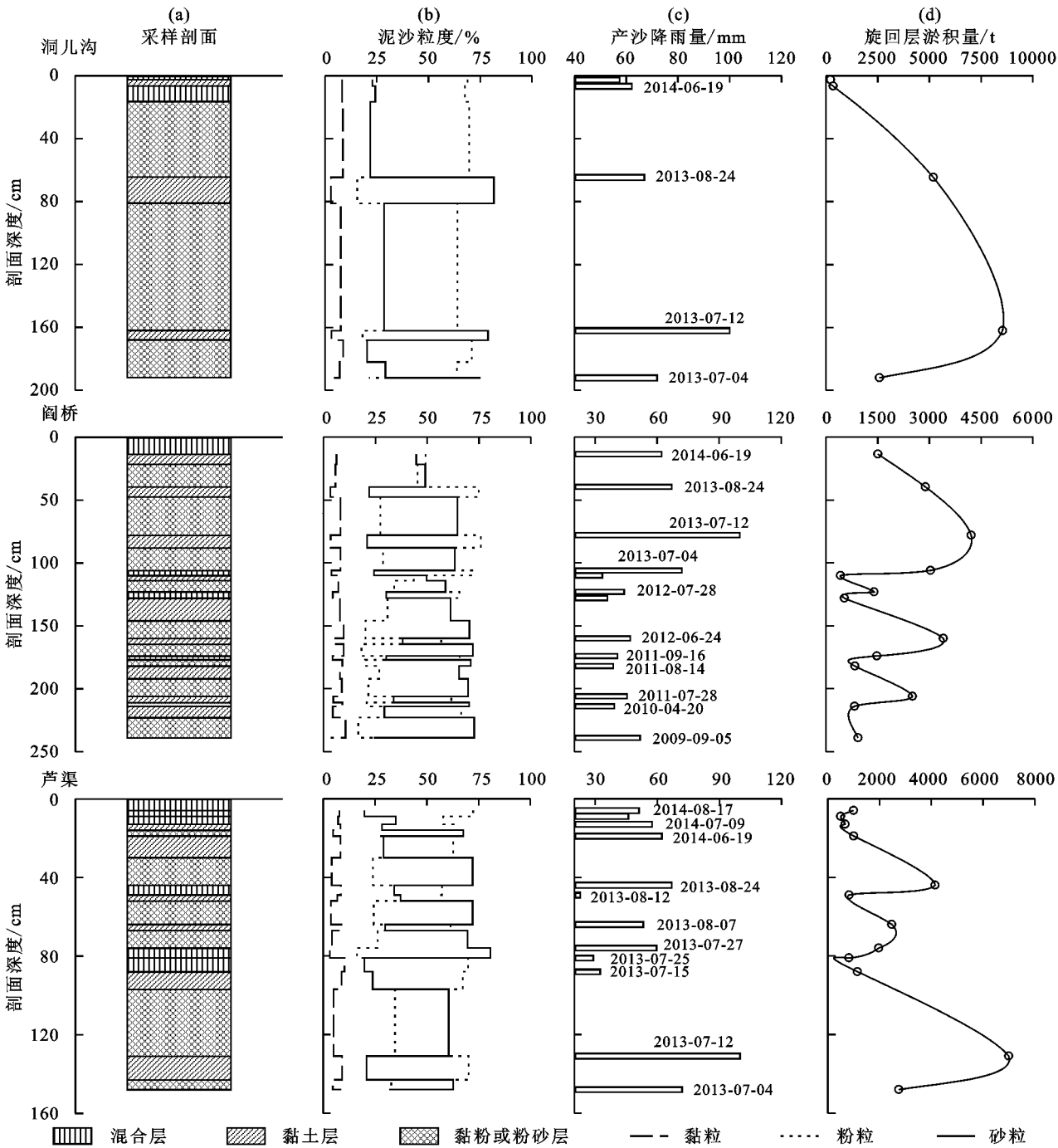


图 3 延河马家沟流域 3 座淤地坝的淤积层次、粒度、次降雨事件与淤积量的对应关系

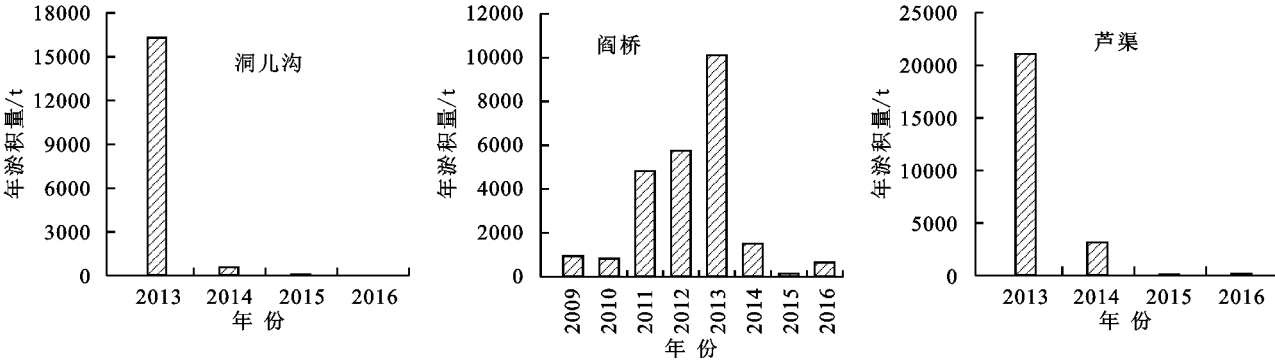


图 4 延河马家沟流域 3 座淤地坝年淤积量变化

4 讨论

黄土高原的土壤侵蚀主要由少数几次大雨或暴

雨所引起,其中 90%以上的降雨不产生地表径流,而 70%的短历时、高强度暴雨导致强烈土壤侵蚀,且洪

峰和沙峰同步,呈大雨对大沙、小雨对小沙的产沙特征^[22]。通过详细分析产沙性降雨和土壤侵蚀之间的关系,表明延河马家沟3个小流域的产沙量与产沙降雨量之间呈显著相关关系($P<0.05$), R^2 值在0.60~0.80。与已有研究^[23-24]结果类似,在延河云台山、坊塌流域和皇甫川小石拉塔、杨家沟流域降雨量与产沙模数之间存在较好的相关关系, R^2 值均 >0.5 以上。当发生侵蚀性降雨事件时(≥ 12 mm),产生的地表径流并不足以将泥沙携带至淤地坝内。本研究中,延河马家沟不同土地利用方式下的洞儿沟、阎桥和芦渠坝控小流域的最小产沙降雨量均 >20 mm以上。相关研究表明,在皇甫川满红沟流域^[24]和小石拉塔流域^[25]的产沙降雨量同样 >20 mm以上。

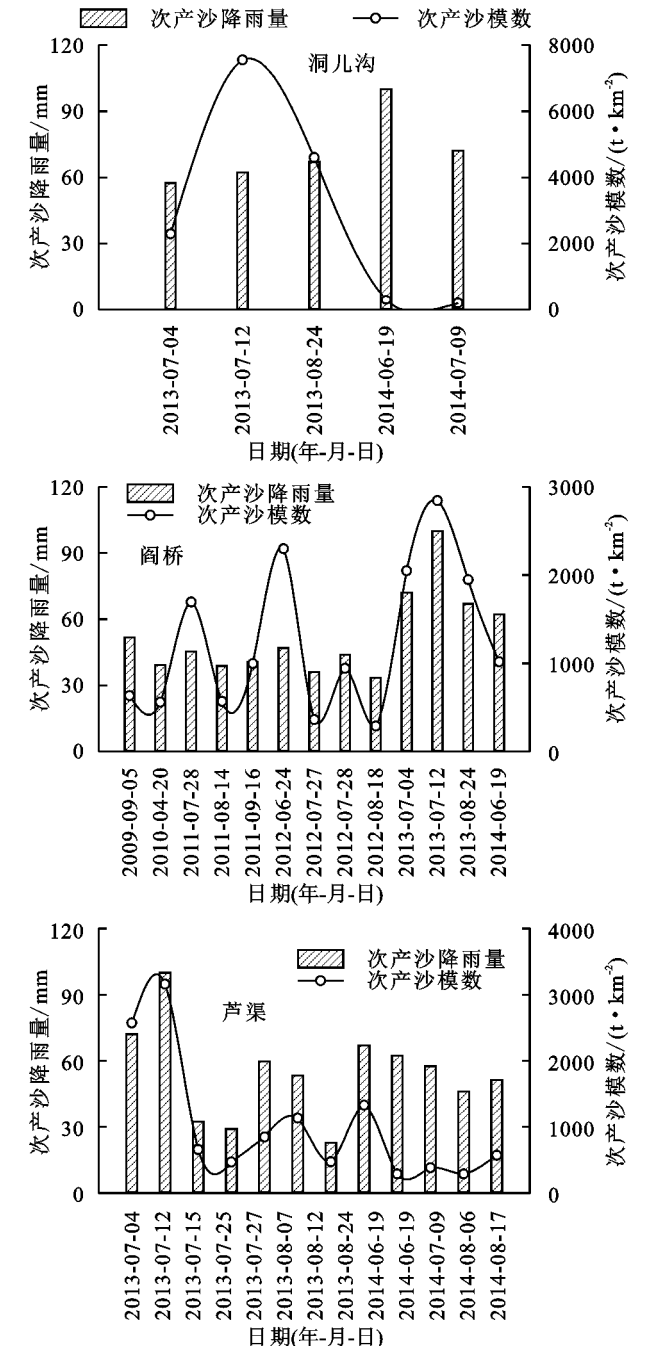


图5 延河马家沟3个小流域次降雨条件下的次产沙模数变化

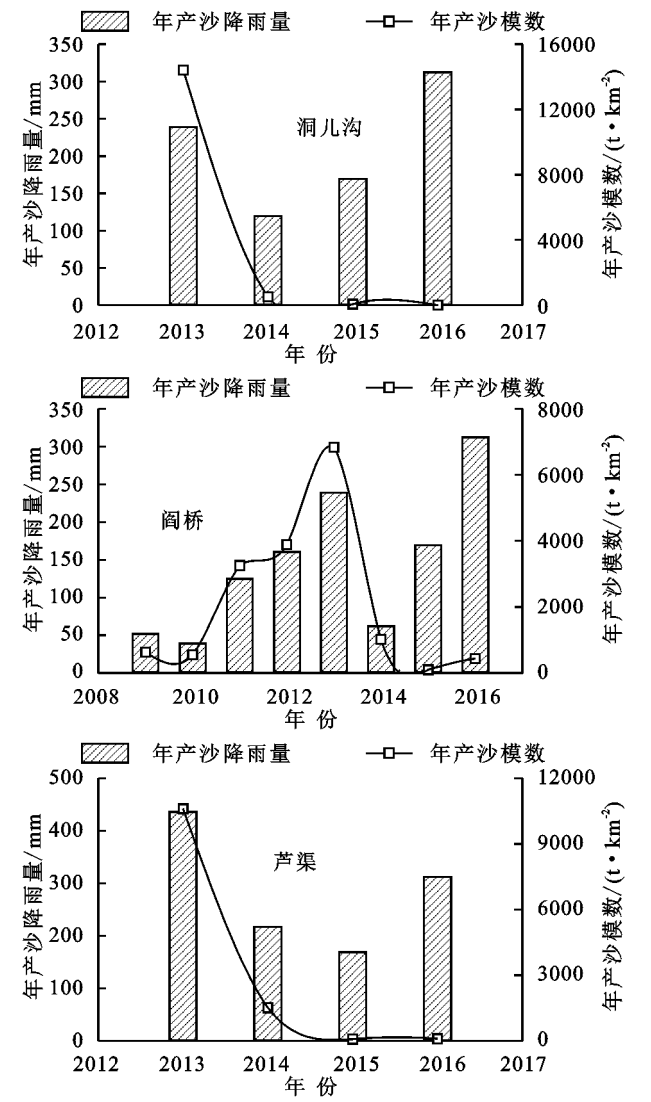


图6 延河马家沟3个小流域年降雨条件下的年产沙模数变化

不合理的土地利用方式是造成黄土高原地区土壤侵蚀严重的根本原因,在不同的土地利用类型下,土壤侵蚀强度亦不同。根据中国的《土壤侵蚀分类分级标准》(SL 190—2007)^[21],西北黄土高原地区的容许土壤流失量为1 000 t/(km²·a),类似于美国中西部的壤质土地地区,其容许土壤流失量在600~1 100 t/(km²·a)^[26]。在延河马家沟流域,3个不同土地利用方式下坝控小流域(洞儿沟、阎桥和芦渠)的多年平均产沙模数分别为2 432.56,3 131.29,1 794.95 t/(km²·a),均超出了黄土高原地区的容许土壤流失量,分别属于轻度、中度和轻度土壤侵蚀。由于梯田能够有效地控制土壤侵蚀,在水土保持效益中作用显著,因此在3个不同土地利用方式的坝控小流域中,梯田面积分布最大的芦渠流域多年平均产沙模数最小。此外,在2013年的极端暴雨年份,延河马家沟3个小流域的产沙模数分别为6 839.15,12 050.57,14 428.83 t/km²,依次属于强烈、极强烈和极强烈侵蚀,可见大暴雨条件下的土壤侵蚀状况依然严重。因

此,在保护现有水土保持措施的基础上,亟需重视黄土高原地区病险淤地坝的除险加固工作,确保淤地坝工程安全度汛,在保障广大人民群众生命财产安全的同时,持续发挥淤地坝的滞洪拦沙效益。

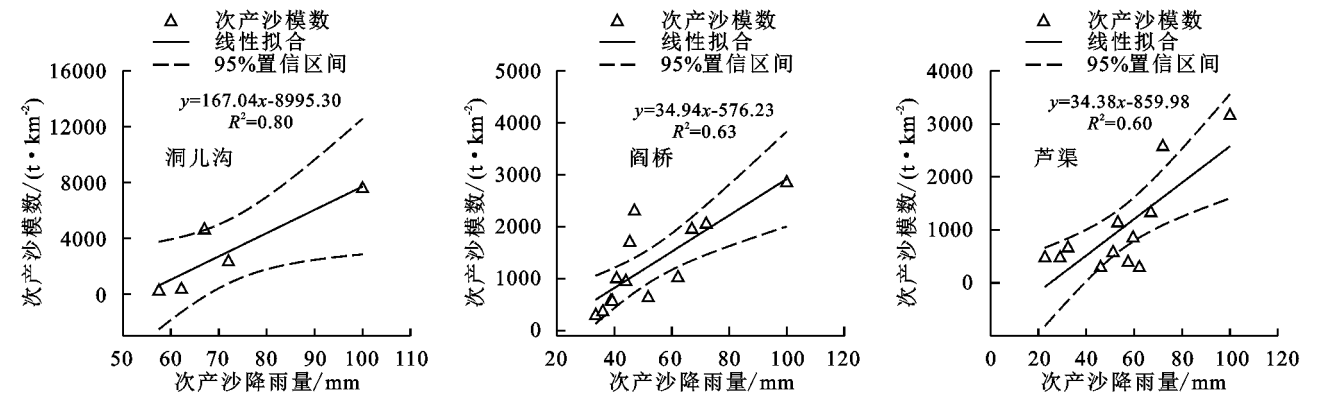


图 7 延河马家沟 3 个小流域次产沙模数与次产沙降雨量之间的关系

表 2 延河马家沟 3 个小流域各土地利用类型面积、流域泥沙淤积总量与产沙模数变化

小流域	土地利用面积/km ²				淤积 总量/t	最小产沙 降雨量/mm	多年平均产沙模数/ (t·km ⁻² ·a ⁻¹)	2013 年产沙模数/ (t·km ⁻²)
	林地	草地	耕地	其他				
洞儿沟	0.65	0.29	0.04	0.16	35734.35	57.5	2432.56	14428.83
阎桥	1.24	0.12	0.12	0.10	50977.40	33.5	3131.29	6839.15
芦渠	1.14	0.08	0.38	0.12	28270.49	22.8	1794.95	12050.57

5 结论

(1)延河马家沟洞儿沟、阎桥和芦渠流域自建坝以来至 2016 年的多年平均淤积量分别为 2 748.80, 4 634.31,3 141.17 t,3 个小流域均在发生极端暴雨的 2013 年出现最大年淤积量,其中芦渠流域由于大量梯田边坡损毁严重,2013 年的年淤积量高达 21 088.50 t。近 2 年人类活动明显的阎桥流域和以梯田为主的芦渠流域淤地坝有泥沙淤积,而以林草为主的洞儿沟流域基本没淤积发生。

(2)延河马家沟洞儿沟、阎桥和芦渠小流域次降雨条件下的平均次产沙模数在 1 154.54~2 988.36 t/km²,主要以微度侵蚀(<1 000 t/km²)为主;自建坝以来至 2016 年的多年平均产沙模数分别为 2 432.56, 3 131.29,1 794.95 t/(km²·a),依次属于轻度、中度和轻度土壤侵蚀;在 2013 年的暴雨年份,3 个小流域的年产沙模数在 6 839.15~14 428.83 t/km²,属于强烈以上侵蚀。

(3)延河马家沟流域 3 个不同土地利用方式下坝控小流域的最小产沙降雨量均>20 mm 以上,且次产沙模数与次产沙降雨量之间呈显著相关关系($P<0.05$), R^2 值在 0.60~0.80。

(4)不同的土地利用方式对小流域侵蚀产沙影响显著,人类活动明显的阎桥流域多年平均产沙模数大于以林草地为主的洞儿沟流域,而主要以林地和梯田为主的芦渠流域多年平均产沙模数最小。因此,在黄土丘陵沟壑区合理配置不同的水土保持措施,是减少小流域侵蚀产沙的有效途径。

参考文献:

[1] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全(西北黄土高原区卷)[M].北京:科学出版社,2010:28-59.

[2] 王志杰.延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D].陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2014.

[3] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004:201.

[4] Xin Z B, Ran L S, Lu X X. Soil erosion control and sediment load reduction in the Loess Plateau: Policy perspectives [J].International Journal of Water Resources Development,2012,28:325-341.

[5] Jin Z, Cui B L, Song Y, et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau? [J].Environmental Science and Technology, 2012, 46 (16): 8527-8528.

[6] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.

[7] Díaz-Gutiérrez V, Mongil-Manso J, Navarro-Hevia J, et al. Check dams and sediment control: Final results of a case study in the upper Corneja River (Central Spain) [J].Journal of Soils and Sediments,2019,19:451-466.

[8] Alfonso-Torreño A, Gómez-Gutiérrez Á, Schnabel S, et al. sUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify volume of sediments retained in check-dams [J].Science of the Total Environment,2019,678:369-382.

[9] 冉大川,左仲国,上官周平.黄河中游多沙粗沙区淤地坝拦减粗泥沙分析[J].水利学报,2006,37(4):443-450.

[10] 中华人民共和国水利部.第一次全国水利普查水土保持

持情况公报[J].中国水土保持,2013(10):2-3.

[11] Abedini M, Said M A M, Ahmad F. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin) [J]. Catena, 2012, 97: 63-70.

[12] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Check dam in the Loess Plateau of China: Engineering for environmental services and food security [J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45: 10298-10299.

[13] 张喜旺,秦奋.砒砂岩地区降雨与植被耦合关系对侵蚀产沙的影响[J].地理研究,2016,35(3):513-524.

[14] 陈赛赛,杨艳丽,孙艳玲,等.1984—2013 年于桥水库流域土地利用变化对植被覆盖度的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2016,36(2):39-46.

[15] 李耀军,魏霞,李勋贵,等.淤地坝坝控流域土地利用类型空间优化配置研究[J].兰州大学学报,2016,52(3):307-312.

[16] 黄志霖,陈利顶,傅伯杰,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同植被类型减蚀效应及其时间变化[J].中国水利,2004(20):38-40.

[17] 付艳玲,张晓萍,陈凤娟,等.黄土区退耕背景下土地利用/覆被格局现状调查研究:以安塞县马家沟流域为例[J].水土保持研究,2010,17(6):81-85.

[18] 党小虎,刘国彬,孟文文,等.基于虚拟水的小流域综合治理水资源响应[J].人民黄河,2013,35(3):55-57.

[19] 吴艳,张晓萍,陈凤娟,等.陕北典型流域退耕后土壤侵蚀及空间分布初步调查研究[J].水土保持研究,2010,17(4):29-33.

[20] 范利杰.皇甫川坝控小流域侵蚀产沙强度与泥沙来源研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.

[21] 中华人民共和国水利部.SL 190—2007 土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[22] 魏霞,李占斌,李鹏,等.黄土高原典型淤地坝淤积机理研究[J].水土保持通报,2006,26(6):10-13.

[23] Zhao G J, Mu X M, Han M W, et al. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau [J]. Catena, 2017, 149: 110-119.

[24] Wei Y H, He Z, Jiao J Y, et al. Variation in the sediment deposition behind check-dams under different soil erosion conditions on the Loess Plateau, China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43: 1899-1912.

[25] Zhao G J, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China [J]. Geomorphology, 2015, 241: 343-352.

[26] 张信宝,焦菊英,贺秀斌,等.允许土壤流失量与合理土壤流失量[J].中国水土保持科学,2007,5(2):114-116.

(上接第 95 页)

[15] 成婧,吴发启,路培,等.玉米苜蓿间作的蓄水保土效益试验研究[J].水土保持研究,2012,19(3):54-57.

[16] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.黄土丘陵沟壑区典型农作物产流产沙效应研究[J].水土保持研究,2020,27(2):99-103,111.

[17] 朱燕琴,赵志斌,齐广平.黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):9-16.

[18] 徐宁,吴发启,杨一凡,等.大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究[J].水土保持学报,2020,34(3):42-48.

[19] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.

[20] 于海影,韦安胜,陈竹君.杨凌示范区土地利用现状分析与评价[J].水土保持研究,2015,22(5):158-162.

[21] 杨陵区地方志编撰委员会.杨陵区志[M].西安:西安地图出版社,2004.

[22] 李方越,曹明明.陕西省 15°以上坡耕地利用与退耕还林技术对策[J].水土保持通报,2001,21(5):49-52.

[23] 马波,耿晓晨,马璠,等.模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(6):207-214.

[24] 刘战东,高阳,段爱旺,等.麦田降雨产流过程的影响因素[J].水土保持学报,2012,26(2):38-44.

[25] 吴佳,王林华,李占斌,等.中小雨强下谷子坡地的降雨入渗特征模拟[J].西北农林科技大学学报,2015,43(6):228-234.

[26] 王计磊,吴发启.种植玉米对黄土坡面径流侵蚀特征及养分流失量的影响[J].泥沙研究,2016(6):44-50.

[27] 苏远逸,李鹏,任宗萍,等.坡度对黄土坡面产流产沙过程及水沙关系的影响[J].水土保持研究,2020,27(2):118-122.

[28] 姚冲,查瑞波,黄少燕,等.模拟降雨条件下第四纪红黏土坡面侵蚀过程[J].水土保持学报,2018,32(3):10-15.