

汾河上游不同土地利用方式对坡地水土流失的影响

杜 轶¹, 郭青霞¹, 郭汉清², 张 勇³, 白秀梅²

(1.山西农业大学资源环境学院,山西 太谷 030801;2 山西农业大学林学院,
山西 太谷 030801;3.山西省水土保持科学研究所,太原 030045)

摘要:以汾河上游阳坡小流域为研究区,在 2015—2017 年进行了天然降雨条件下的坡面产流产沙小区试验,结果表明:(1)研究区的侵蚀性降雨在年上和年际间分布很不均匀。少数几次强降雨对降雨侵蚀力的贡献很大。(2)不同侵蚀性降雨条件下,鱼鳞坑+乔木或灌木拦蓄径流或泥沙能力最强,裸地最弱;坡面产流量大小依次为:裸地>坡耕地>草地>油松>黄刺玫>鱼鳞坑+油松>鱼鳞坑+黄刺玫。坡面产沙量大小规律为:鱼鳞坑+乔或灌<草地<乔或灌<坡耕地<裸地。(3)随着雨量增加,各植被小区的径流调控率和泥沙调控率均呈下降趋势;相近雨量时,随着雨强的增加,径流调控率和泥沙调控率明显下降。(4)各小区的降雨量和产流量、产流量和产沙量之间呈现显著正相关($P<0.05$)。在裸地、黄刺玫及草地小区, I_{30} 与产流量之间是均无显著相关。在裸地、油松、黄刺玫、耕地小区, I_{30} 和产沙量之间无显著相关。

关键词:土地利用;次降雨;径流;泥沙

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0044-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.04.007

Effects of Different Land Uses on Water and Soil Erosion in the Upper Area of Fen River

DU Yi¹, GUO Qingxia¹, GUO Hanqing², ZHANG Yong³, BAI Xiumei²

(1.College of Resource and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 2.College of Forestry,
Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801; 3.Shanxi Institute of Soil and Water Conservation, Taiyuan 030045)

Abstract: Based on field observations of runoff and sediments of water and soil erosion under different land uses generated on runoff plots and rainfall data from 2015 to 2017, we studied quantitatively the effects in upper area of Fen River. The results showed that: (1) The distribution of erosion rainfall in the study area was very uneven within a year and between years. Several times of heavy rainfall contributed a lot to the erosion of rainfall. (2) Under different rainfall conditions, the runoff or sediment holding capacity of the fish-scale pit + trees or shrubs was the strongest, while the bare land was the weakest. The runoff yield on slope was as follows: bare land>slope farmland>grassland>*Pinus tabuliformis* Carrière>*Rosa xanthina* Lindl.>fish-scale pit and *Pinus tabuliformis* Carrière>fish-scale pit and *Rosa xanthina* Lindl.. The slope sediment yield was: fish-scale pit and trees or shrubs<grass<trees or shrubs<slope farmland<bare land. (3) With the increase of rainfall, both the runoff regulation rate and sediment regulation rate of each vegetation plot showed a downward trend. With the increase of rainfall intensities, both regulation rates decreased obviously. (4) There were significant positive correlations between rainfall and runoff yield, runoff yield and sediment yield in each plot ($P<0.05$). There was no significant correlation between I_{30} and runoff yield in bare land, *Rosa xanthina* Lindl. and grassland. There was no significant correlation between I_{30} and sediment yield in bare land, *Pinus tabuliformis* Carrière, *Rosa xanthina* Lindl., and slope farmland.

Keywords: land use; single rainfall; runoff; sediment

收稿日期:2019-03-05

资助项目:国家自然科学基金项目(41071345);山西省软科学研究计划项目(2016041027-4)

第一作者:杜轶(1978—),女,山西古县人,硕士,讲师,主要从事土地资源可持续利用研究。E-mail:sfglrw_0615@163.com

通信作者:郭青霞(1969—),女,山西晋城人,博士,教授,主要从事土地资源可持续利用研究。E-mail:gxq696@163.com

水土流失是黄土高原各种生态问题的集中反映,严重威胁着区域生态安全^[1]。汾河是黄河的一级支流,也是黄河的第二大支流。汾河流域面积近4万km²,约占山西省国土面积的25%。由于汾河上游水土流失严重,给太原市的河道治理和行洪安全带来巨大威胁,加剧了太原市的城市内涝。开展汾河流域上游区域不同土地利用条件下的水土流失规律研究,可为汾河流域规划和治理以及太原市防洪防涝提供科学依据。

土地利用方式不同对水土流失具有明显的分异效应^[2]。我国针对不同土地利用条件下水土流失发生发展规律开展了大量的研究,并取得一些成果^[3-7]。1999年以来,汾河流域积极推进退耕还林(草)工程,区域水土流失趋于减缓。然而,在已经进行生态恢复的区域,不同土地利用方式对坡面产流或产沙有哪些响应?能否经受大雨及以上降雨的考验,从而有利于下游城镇防洪安全,仍然是人们普遍关注的问题。

以往在汾河流域开展的研究多侧重于土地利用或退化成因分析^[8-9]、植被覆盖时空变化特征^[10]、汾河水质及地表水健康风险评价^[11]、地表景观演变特征^[12]、生态系统服务变化及驱动因素^[13]以及降水或径流变化特征^[14]等方面。但关于汾河流域不同土地利用方式对流域产流和产沙的响应研究还鲜见报道。

本研究以汾河上游阳坡小流域为研究对象,选取了流域内具有代表性的7种不同土地利用方式,在2015—2017年进行了天然降雨条件下的标准径流小区试验。分析了3年内的侵蚀性降雨及其降雨侵蚀力的年内和年际分布规律,研究了不同土地利用方式

下对坡面产流产沙的影响和调控,以期为汾河上游水土保持综合治理及区域生态安全建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阳坡小流域位于汾河上游(38°14′34″N,112°14′31″E),面积18.09 km²,海拔1320~1950 m,属于太原盆地北部石质山低覆中度侵蚀类型区(Ⅲ)。该流域地处北温带大陆性气候区,多年平均气温9.6℃,年均降水量近500 mm,5—9月降水量占全年降水的80.38%。暴雨主要发生在7—8月份。流域内自然植被主要有油松、黄刺玫、蒿草等。土壤类型为褐土。经过多年的流域综合治理,目前流域内水土流失治理度达到70.7%。当前阳坡小流域的主要土地利用类型为耕地、林地和草地,分别占流域总面积的21.62%,20.35%和53.37%,其他土地利用方式占4.66%。

通过标准径流小区进行试验研究(表1)。小区宽均为5 m,水平投影面积均为100 m²;径流小区周边设有混凝土围堰、植被保护带、排水沟,小区下部设有分(集)流桶等测验设施。同时,径流场内布设CAWS600自动气象站,监测雨量、雨强、降雨历时等气象要素。分(集)流桶为规则正方体,通过量测水位确定次降雨产流量。每次产流后,将桶内径流搅拌均匀,取样瓶取样(6次),测定含沙量。

根据流域内主要土地利用类型,以裸地为对照(CK),其他6种代表性的土地利用方式为:鱼鳞坑+黄刺玫、鱼鳞坑+油松、草地、林地(灌木林地,黄刺玫,高0.90~1.30 m;油松林地,高度2.00~2.20 m)和坡耕地。

表1 径流小区基本概况

小区编号	小区代号	坡度/(°)	坡向/(°)	覆盖度/%	土地利用方式
3	CK	18	225	—	裸地,无植被,喷洒除草剂保持坡面裸露休闲
1	GH	18		60~90	鱼鳞坑整地(长径×短径×坑深=0.8 m×0.5 m×0.5 m),黄刺玫纯林(行距×株距=1.2 m×1.5 m),鱼鳞坑内有2~3 cm厚枯落物
2	GY	18	225	75~80	鱼鳞坑整地(长径×短径×坑深=0.8 m×0.5 m×0.5 m),油松纯林(行距×株距=1.5 m×2.5 m),鱼鳞坑内有2~3 cm厚枯落物
4	CD	18	225	85~95	草地,主要草本为蒿草,高0.2~0.5 m
5	YS	18	225	70~80	油松纯林,行距×株距=1.5 m×2.5 m,地表枯落物厚度0.5~1.5 cm
6	HC	18	225	75~85	黄刺玫纯林,行距×株距=1.2 m×1.5 m,地表枯落物厚度0.5~1.0 cm
7	GD	18	225	0~80	土豆(行距×株距=0.3 m×0.3 m)或胡麻(条播,行距为15 cm),隔年换茬,横坡耕作

1.2 研究方法与数据处理

采用天然降雨条件下的径流小区定位试验。观测数据主要包括2015—2017年4—10月逐次降雨信息(雨量、雨强、历时等)和7种不同土地利用方式小区的产流量和产沙量。为了更好地研究不同土地利

用方式对该流域次降雨的响应,首先对流域内侵蚀性降雨进行统计分析,并计算了次降雨的降雨侵蚀力(R值)。然后对雨量相近的大雨、暴雨和大暴雨资料进行提取,分析不同雨量或相近雨量对不同土地利用各小区产流产沙的影响。采用SPSS 13.0软件进行

多元线性回归统计分析和显著性检验(Spearman)。

1.2.1 降雨侵蚀力计算 降雨侵蚀力(R 值)是 USLE 和 RUSLE 方程中表示降雨引起侵蚀潜在能力的一个因子。Wischmeier^[15]首次提出利用次降雨总动能和最大 30 min 雨强二者的乘积作为衡量降雨侵蚀力大小的指标。该指标是目前研究土壤侵蚀对降雨变化响应的最好因子,但 R 值很难直接测量,其精确值一般多根据次降雨侵蚀力指标计算,国外许多学者对 R 值进行了诸多分析验证^[16-18],我国学者^[19-21]通过包含不同降雨特征信息的年、月和日降雨量等资料分析研究了不同区域的 R 值,并提出了若干 R 值的简易算法和计算公式。本研究采用第 1 次全国水土保持专项普查使用的 R 值算法,该算法由章文波等^[22]提出的 R 值估算模型改进而来。其公式为:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta$$

表 2 次降雨基本特征

降雨时间 (年-月-日)	代号	降雨量/ mm	雨强 I_{30} / (mm · 30 min ⁻¹)	平均雨强/ (mm · h ⁻¹)	降雨侵蚀力/ (MJ · mm · hm ⁻² · h ⁻¹ · a ⁻¹)
2016-08-24	D1	45.6	38.70	2.8	343.03
2016-10-06	D2	44.4	6.04	3.5	325.47
2017-08-22	D3	48.6	6.00	2.0	388.91
2015-06-28	B1	57.4	6.40	3.4	539.79
2017-06-17	B2	57.0	86.60	17.1	532.41
2017-07-25	B3	55.4	21.40	3.0	503.37
2016-07-18	DB1	111.2	11.30	3.0	1986.08
2017-10-08	DB2	124.0	11.20	2.3	2461.57

1.2.3 不同坡面处理对坡耕地产流、产沙调控率

为了研究不同土地利用方式对坡面产流、产沙的调控作用,引入径流调控率和泥沙调控率 2 个指标^[24]。其中径流(产沙)调控率指坡面采取某种调控措施后单位(时间或面积)产流量(产沙量)相对于对照条件下单位产流量(产沙量)的变化百分率。

$$K_w = \frac{W_s - W_0}{W_0}, \quad K_s = \frac{G_s - G_0}{G_0}$$

式中: K_w 、 K_s 分别为径流调控率和泥沙调控率(%); W_s 、 W_0 分别为处理坡面和对照坡面(CK)的单位面积产流量(m³/hm²); G_s 、 G_0 分别为处理坡面和原状坡面的单位面积产沙量(t/km²)。

2 结果与分析

2.1 试验期内降雨及降雨侵蚀力分布特征

2.1.1 侵蚀性降雨分布特征 雨量资料(图 1)表明,2015 年、2016 年、2017 年 4—10 月侵蚀性降雨量占年降雨总量分别为 44.88%、63.41%、70.88%。2015 年、2016 年、2017 年 6—9 月侵蚀性降雨量分别占全年降雨量的 35.75%、40.45%、48.18%。2015 年和

式中: R_i 为第 i 个半月时段的侵蚀力值(MJ · mm/(hm² · h · a)); k 为该半月时段内的降雨天数; P_j 为半月时段内第 j 天的日雨量(mm)。进行计算时,要求日雨量 ≥ 12 mm(12 mm 雨量为黄土高原的侵蚀性降雨的临界值)^[23]。 α 和 β 为公式中的 2 个参数,章文波等^[22]根据太原地区雨量资料估算其值分别为 0.185 和 1.970。在此基础上以阳坡小流域逐年侵蚀性次降雨量进行 R 值估算。

1.2.2 次降雨选择 2015—2017 年侵蚀性降雨(≥12 mm)次数分别为 8,19,17 次,2015 年大雨、暴雨次数各为 1 次;2016 年大雨、暴雨次数分别为 4,1 次;2017 年大雨、暴雨次数各为 4 次。本研究主要关注大雨及以上侵蚀性降雨对不同土地利用方式坡面产流产沙及不同土地利用方式对坡面径流和泥沙调控能力,故从 2015—2017 年雨量资料进行摘录,选择雨量接近的大雨、暴雨和大暴雨共 8 次。各次降雨基本信息见表 2。

2016 年雨量年内分布均呈现单峰,但 2015 年侵蚀性降雨 6 月最多,峰值出现时间较多年平均提前;2016 年侵蚀性降雨峰值出现在 7 月,9 月侵蚀性降雨偏少,10 月侵蚀性降雨偏多;2017 年 5,9 月无侵蚀性降雨,10 月侵蚀性降雨则大大高于多年同期平均。

2.1.2 降雨侵蚀力分布特征 由于 2015 年、2016 年、2017 年 4—10 月之外无侵蚀性降雨,则 2015 年、2016 年、2017 年 4—10 月的 R 值即可代表年 R 值。2015 年、2016 年、2017 年 R 值分别为 826.31,2 708.82,3 974.47 (MJ · mm)/(hm² · h · a)。2017 年 R 值是 2015 年 R 值的 4.81 倍,可见 R 值在年际之间变化强烈。

2015 年、2016 年、2017 年的 R 值年内平均分布情况表明,4—10 月 R 值分别占到年 R 值的比例为 3.24%、1.85%、16.74%、28.98%、25.38%、1.15% 和 22.64%。6—8 月占到全年的 71.11%,9 月仅占 1.15%,而 10 月占 22.64%。2015 年和 2016 年内分别只有 1 次暴雨,次暴雨 R 值分别占到全年 R 值的 57.29%、27.50%;2017 年共发生 4 次暴雨,暴雨 R 值占全年 R 值的 64.73%。2015—2017 年年内侵蚀性降雨的最大 R 值和最小 R 值

的极值比分别为 17.39, 27.37, 33.93, 说明 R 值在年内分布非常不均匀。少数几次强降雨就可对年 R 值产生非常大的影响。以上分析说明, R 值空间分布特征基本与

年均降水量的空间分布基本一致, 但降雨侵蚀力具有明显年际变化、年内分配不均性和空间异质性等特征, 这一结论与前人^[25]研究一致。

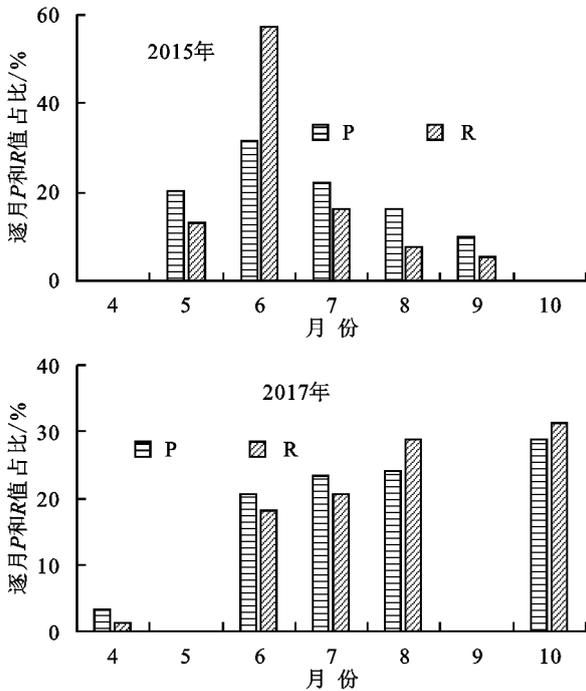


图1 2015年、2016年、2017年降雨量(P)和降雨侵蚀力(R)占比分布

2.2 不同土地利用方式条件下坡面产流特征

3次大雨(D1、D2、D3)条件下, 7类小区均有坡面产流(图2)。3次大雨在各小区的总径流深为 4.79~22.35 mm, 径流系数为 3.53%~16.48%。其中, 径流深最小的是 GH(鱼鳞坑+黄刺玫), 最大的是 CK(裸地)。D1次降雨 I_{30} 高达 38.7 mm/30 min, 径流系数为 8.38%~31.01%, 远高于其他 2次大雨。D2次降雨和 D3次降雨的 I_{30} 非常接近, 但 D2次降雨时各径流小区的径流系数(1.40%~10.36%)均比 D3(0.72%~8.07%)明显偏高, 主要原因可能在于 D3次降雨发生在 8月22日, 时值盛夏时期, 各小区植物生长茂盛, 地表覆盖度高, 导致产流较少。从各小区径流总量来看, 7种土地利用方式坡面产流大小依次为: CK>GD>CD>YS>HC>GY>GH。

3次暴雨(B1、B2、B3)条件下, 7类小区的总径流深为 10.76~40.61 mm, 径流系数为 6.34%~23.91%。B1暴雨各小区径流深最小, 介于 0.86~5.71 mm, 径流深最小为鱼鳞坑+黄刺玫小区, 最大为裸地小区。B2暴雨的 I_{30} 为试验期内最大, 产流也远高于其他 2次暴雨。B2暴雨在裸地小区的径流系数高达 39.88%, 在工程措施+乔灌小区的径流系数也高达 13.65%以上。

2次大暴雨(DB1、DB2)条件下, I_{30} 雨强非常接近, 除 DB1次降雨的坡面产流在裸地小区略高于 DB2的坡面产流, 其他各小区 DB1次降雨的产流量

均低于 DB2次降雨的产流量。原因可能与 DB1发生在 7月中旬, 当时地表植被茂盛, 郁闭度高, 加之 I_{30} 雨强处于中等水平, 降雨历时又较长, 导致坡面产流强度较低, 各小区形成的径流深相对较小。2016年坡耕地小区种植胡麻, 采用条播方式, 行距 15 cm, 播种密度大, 因此条带状密植不利于坡面产流。相比之下, DB2发生在 2017年 10月, 当时土豆植株已经枯萎, 对降雨的减流作用明显降低。

地表径流是侵蚀性降雨和下垫面共同作用的结果。降雨特征不同, 产流量会有较大差异; 降雨特征相近时, 由于不同土地利用方式不同, 地表植物生长状况不同也会影响坡面产流。裸地经过人为极端处理, 地表无任何植被覆盖, 没有植被参与土壤发育和肥力改善, 加之前期降雨雨滴溅蚀或坡面径流的面蚀作用, 导致土壤板结, 坡面径流下渗受阻, 从而有利于形成地表径流; 坡耕地的地表盖度具有鲜明的阶段性, 其植被盖度从播种期到收获期为 0~0.8。在坡耕地覆盖度较低时(如播种期或收获后, 地表覆盖度近于 0), 若遇强降雨, 就可能形成较大产流; 反之, 当坡耕地的植被进入生长旺季时, 会抑制坡面径流形成。同时可以看出, 坡面布设水土保持工程措施如鱼鳞坑则可极大地削减地表径流, 主要因为一方面可以通过穴坑有效截留和蓄存水分, 另一方面鱼鳞坑改变了坡面的均一性, 延缓坡面径流流速, 从而促进坡面径流下渗。综上所述, 土地利用方式不同, 降雨特征也有所差异, 但

坡面产流量大小具有一定的规律性,即鱼鳞坑+乔或灌<乔或灌<草地<坡耕地<裸地。

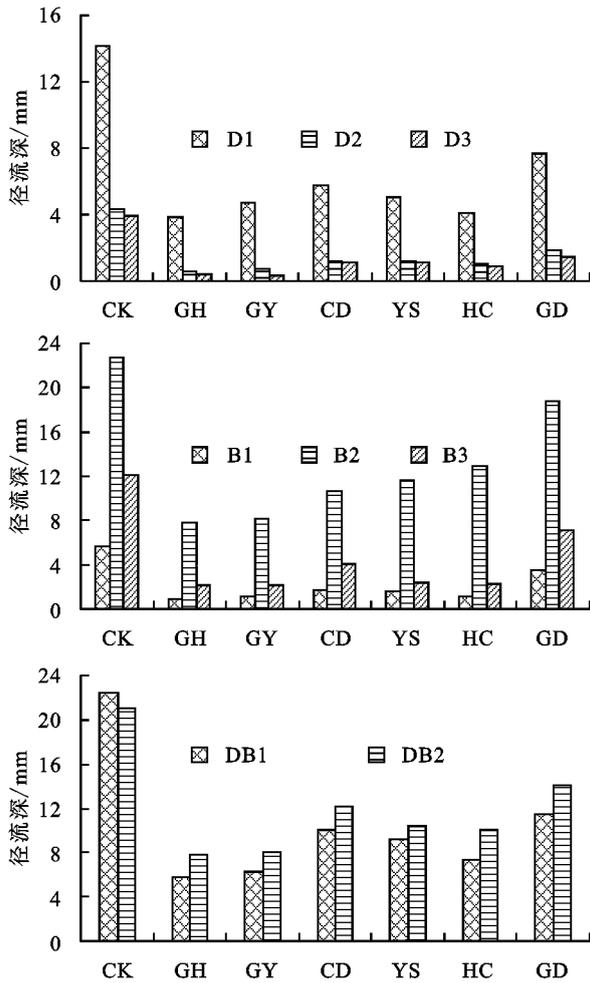


图 2 不同土地利用方式的坡面产流量

2.3 不同土地利用方式条件下坡面产沙特征

8次典型降雨在7类不同土地利用小区均有地表径流产生,同时也形成了坡面产沙(图3)。3次大雨(D1、D2、D3)在各小区的产沙量为 $2.53\sim 13.94\text{ kg/m}^3$ 。其中,CK小区总产沙量最大,GH小区产沙量最小。D1次降雨雨量跟D2和D3接近,但雨强远超其他2次大雨,导致D1次降雨在各小区的坡面产沙量占对应小区总产沙量的 $47.70\%\sim 71.10\%$,明显超过其他2次降雨的产沙量。D2雨量较D3雨量小 8.64% , I_{30} 雨强非常接近,但D2次降雨各小区产沙均超过D3次降雨。D3次降雨发生在地表植被生长茂盛,地表覆盖度高,导致产流较低,从而产沙量较D2低。暴雨条件下,各小区产沙量较大雨时更为明显,各小区产沙量为 $7.96\sim 29.25\text{ kg/m}^3$ 。B2暴雨和其他2次暴雨雨量接近,但B2降雨历时短,且 I_{30} 远超B1和B3,导致B2各小区产沙量占到3次暴雨对应总产沙量的 $52.24\%\sim 65.62\%$ 。大暴雨条件下,DB2雨量比DB1多 11.51% ,历时也短,但各小区产沙量在DB1次降雨条件下均比DB2小。这可能与

DB1次降雨发生在7月下旬,地表植被较为茂盛,坡面产流较少,挟沙能力降低有关。

分析表明,降雨特征不同,土地利用方式各异,但7类小区的坡面产沙大小规律基本为:鱼鳞坑+乔或灌<草地<乔或灌<坡耕地<裸地。坡面进行水土保持工程措施和乔或灌措施相结合,可以极大地减少坡面产沙;而草地则通过其较高的种植密度,减缓坡面径流流速,降低径流挟沙能力,表现出具有优于单纯乔木或灌木小区的减沙效果;裸地则因没有地表植被的保护,水土流失明显加剧。不同土地利用方式下,降雨与产流和产沙间的关系表现出一定的差异,这主要与植被覆盖、水土保持措施类型以及人类活动干扰有关^[26]。

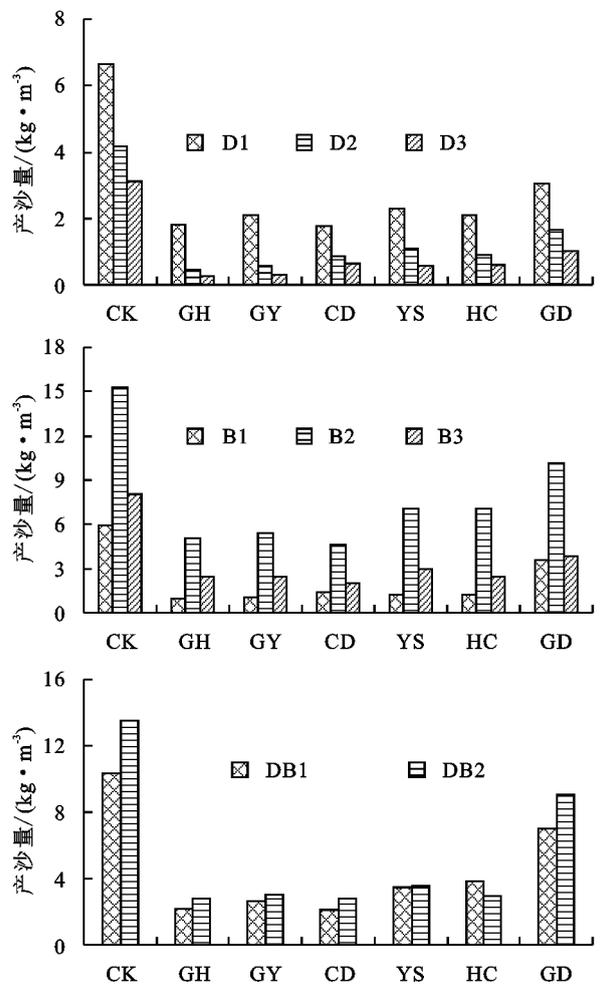


图 3 不同土地利用方式的坡面产沙量

2.4 不同土地利用方式下坡面产流调控比较

比较不同土地利用方式对坡面产流的调控能力(表3)可以看出,相对于CK小区,其他6类不同土地利用方式均对坡面产流具有一定的调控能力。大雨条件下,6类小区对坡面径流的调控率为 $45.90\%\sim 90.05\%$,其中,GH和GY调控径流能力最高,CD、YS、HC次之,GD调控径流能力最低;坡面在进行鱼鳞坑整地并种植乔木或灌木后,可以有效调控坡面径流。CD调控径流能力不

及YS和HC,这可能与CD在0—15 cm土层根系密集,坡面径流反而不易下渗有关。在相近雨量条件下,GD对于产流的调控能力有较大差异,这主要与该小区植

被类型不同有关,如胡麻采用条播方式,其调控坡面径流的能力较种植土豆时强,同时也与该小区植被的生长时期有很大关系。

表3 不同土地利用方式对径流调控比较

小区代号	降雨类型							
	D1	D2	D3	B1	B2	B3	DB1	DB2
GH	-72.98	-86.48	-90.05	-84.94	-65.77	-82.57	-74.05	-63.05
GY	-66.62	-83.45	-89.54	-79.86	-64.14	-82.24	-72.31	-61.86
CD	-59.19	-71.56	-71.17	-70.58	-53.01	-66.37	-55.06	-42.46
YS	-64.21	-71.33	-72.19	-71.80	-48.88	-80.84	-59.07	-50.81
HC	-70.86	-75.29	-76.53	-79.51	-43.20	-81.50	-67.19	-52.37
GD	-45.90	-57.34	-63.78	-38.00	-17.42	-41.12	-48.77	-33.44

土地利用方式不同对坡面产流的调控能力差异较大,其调控坡面产流能力大小的基本规律表现为:鱼鳞坑+乔或灌>乔或灌>草地>坡耕地>裸地。同时可以看出,随着雨量增加,各小区的调控径流能力有所下降;同一雨量条件下,随着雨强(I_{30})增加时,各小区的调控径流能力也呈下降趋势。坡面产流的能力大小与雨量有很大关系,也可能跟雨强(尤其是 I_{30})关系可能更为密切;地表植被参与了径流形成,其植被类型和生长季节对于调控产流影响很大。由此也可以看出坡面产流是气象因素和下垫面共同耦合的产物。

2.5 不同土地利用方式下坡面产沙调控比较

不同土地利用方式坡面产沙量均小于CK,说明其他6类土地利用方式对坡面产沙具有调控作用。在大雨条件下,不同土地利用方式调控产沙能力为54.15%~91.01%;在暴雨条件下,调控产沙能力为33.84%~84.43%;大暴雨条件下,调控产沙能力为32.04%~79.50%(表4)。随着雨量增加,调控泥沙能力存在下降趋势。同一雨量条件下,雨强增大时,各小区调控产沙能力均呈下降趋势。在雨量较大且雨强也较高时,次降雨(如D1或B2)对于坡面产沙的贡献较为突出。

表4 不同土地利用方式对坡面产沙调控比较

小区代号	降雨类型							
	D1	D2	D3	B1	B2	B3	DB1	DB2
GH	-72.98	-89.22	-91.01	-84.43	-66.88	-70.10	-78.61	-79.50
GY	-68.48	-86.11	-90.04	-82.22	-64.53	-69.35	-74.73	-77.65
CD	-73.17	-79.64	-80.08	-77.04	-69.76	-75.34	-79.28	-79.42
YS	-65.55	-73.89	-82.01	-78.72	-53.88	-63.03	-66.31	-73.50
HC	-68.26	-77.96	-80.40	-79.31	-53.88	-69.35	-62.83	-78.39
GD	-54.15	-60.36	-67.23	-39.73	-33.84	-52.61	-32.04	-32.80

各不同土地利用小区对于坡面产沙的调控表现出一定的规律性,即在产流较多时,产沙也较多。对于草地小区,其坡面产流较多,而坡面产沙却较少。这可能是由于草地植被密度大,对坡面径流的流速起到延缓作用,加上草地根系集中在地表0—20 cm,根系固持表土的能力强,故相对其他土地利用小区可以更有效地减少坡面产沙。耕地小区与其他小区相比,地表的覆盖度变化剧烈;若在生长旺季,地表植被茂盛,则对坡面产沙调控能力明显增强;而在6月或更早时期,其地表植被盖度较低,若发生强降雨,则会形成较强的土壤流失。在秋季,地表植被枯萎或者因收获,地表植被盖度急剧下降,也会因强降雨导致土壤流失加剧。另一方面,耕地小区的植被类型也会对坡

面产沙的调控能力形成明显影响,如胡麻因其播种密度大,且为条播方式,对坡面产沙调控能力优于土豆。

外源的雨滴击溅或坡面径流为泥沙输移提供动力。植被的地上部分可以减弱雨滴击溅侵蚀,并延缓径流流速,削弱径流挟带泥沙能力;植被地下部分的生长会促进土壤结构优化,促进下渗,并固持土壤,这种立体网络结构增强了对泥沙形成的调控作用。从这个意义上讲,有效增加地表覆盖,调控坡面径流是减少水土流失的关键。

2.6 基于多元线性回归分析的次降雨因子对径流泥沙的影响分析

选取2015—2017年降雨量为大雨及以上的15次侵蚀性降雨,7类不同土地利用方式的坡面小区产流和产

沙数据进行 Spearman 相关分析,并进行单尾检验($P < 0.05$)(表 5)。结果显示,不同土地利用方式下,降雨因子与坡面产流量、产沙量间的相关性差异明显:裸地条件下,降雨量、降雨强度与产流量、产沙量间均呈显著正相关关系;且产流量与产沙量之间显著相关; I_{30} 和产流量及产沙量之间的相关性不显著。鱼鳞坑+黄刺玫条件下,除降雨量和产沙量之间无显著相关外,其他指标之间均显著相关。鱼鳞坑+油松条件下,各指标间均存在

显著相关。草地条件下,除 I_{30} 和产流量之间无显著相关外,其他指标间均显著相关。油松条件下,除 I_{30} 与产沙量之间无显著相关外,其他指标之间均显著相关。黄刺玫条件下,降雨量和产流量之间显著相关,且相关系数最高,说明在该土地利用方式下,坡面产流与降雨量之间的关系更为密切。耕地条件下,降雨量、 I_{30} 、产沙量分别与产流量间均有显著相关,但降雨量和产沙量间无显著相关。

表 5 不同土地利用方式坡面产流产沙量与降雨的相关性

土地利用方式	降雨量和产流量	产流量和 I_{30}	降雨量和产沙量	产沙量和 I_{30}	产流量和产沙量
CK	0.811**	0.490	0.797**	0.466	0.895**
GH	0.720*	0.529*	0.280	0.676*	0.797**
GY	0.685**	0.595*	0.802*	0.736*	0.914**
CD	0.678**	0.438	0.657*	0.550*	0.860**
YS	0.629*	0.648*	0.615*	0.431	0.790**
HC	0.972**	0.480	0.601*	0.312	0.706*
GD	0.601*	0.564*	0.427	0.406	0.714**

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

3 讨论

本研究表明,不同模式的坡面处理在拦蓄径流、减沙减蚀方面均优于耕地和裸地。有效增加地表植被对促进水土保持意义重大。因此在汾河上游应进一步加大退耕还林(草)力度,在已经进行退耕或植被恢复区域可以适当增加鱼鳞坑或其他水土保持工程措施;坡耕地可以采取套种措施,增加地表覆盖度,促进减流减沙,减缓区域水土流失,减轻下游城镇防洪防涝压力。

不同土地利用方式对坡面的产流产沙及利用方式对坡面产流产沙的调控作用说明,退耕还林(草)均可在一定程度上缓解水土流失。已有研究^[26]表明,植被覆盖度越高,植被越完整,其阻滞和拦蓄径流的能力越强;在天然降雨条件下,农田水土流失量最大,而乔灌林地及草地相对较小。不同土地利用方式对坡面产流产沙的调控作用,在不同性质的降雨(雨量、雨强或历时等)条件下,会做出不同的响应。但是流域地形复杂,到底同一土地利用方式在不同坡度的情况下响应如何,仍需进一步深入研究。同一植被类型,在区域内的栽植密度和方式也会对坡面产流或产沙形成较为明显的影响。耕地在地表的盖度具有鲜明的季节性,导致其盖度变化较其他小区更为剧烈。因此对占到区域土地利用方式比重较大的坡耕地而言,选择合理的农艺水土保持措施至关重要。

进行降雨侵蚀力计算时,根据前人^[27]研究结论,人为设定侵蚀性降雨为 12 mm。但在本试验中发

现 < 12 mm 的降雨在部分小区也会有坡面产流或产沙。类似的结论在其他研究^[27-28]中也有体现,表明设定侵蚀性降雨阈值为 12 mm 不尽合理。另外,部分降雨侵蚀力计算模型中未考虑 I_{30} 或平均雨强等要素,导致分析侵蚀性降雨对坡面产沙产流的影响时不够全面。合理地建立 R 值计算模型仍需进行更多的探讨。部分研究^[23]认为,我国大部分地区年降雨侵蚀力呈增加趋势,只有少数地区年降雨侵蚀力存在下降的趋势。由于阳坡小流域雨量资料有限,降雨侵蚀力变化是否与以上研究结论一致尚需较长时间尺度的资料进行验证。

4 结论

(1)侵蚀性降雨在年内和年际间分布很不均匀。次降雨量占年降雨量的比例较高,少数几次强降雨对降雨侵蚀力的贡献很大。2015—2017 年的平均侵蚀性降雨和降雨侵蚀力集中在 6—8 月,2017 年 10 月的降雨明显高于多年平均。强降雨为引发坡面产流和产沙提供了外源动力。

(2)土地利用方式不同,坡面产流能力差异较大,鱼鳞坑+乔木或灌木拦蓄坡面径流能力最强,裸地最弱;7 种土地利用方式坡面产流大小依次为:裸地 $>$ 坡耕地 $>$ 草地 $>$ 油松 $>$ 黄刺玫 $>$ 鱼鳞坑+油松 $>$ 鱼鳞坑+黄刺玫。各小区的坡面产沙大小规律为:鱼鳞坑+乔或灌 $<$ 草地 $<$ 乔或灌 $<$ 坡耕地 $<$ 裸地。

(3)随着雨量增加,各植被小区的径流调控率和泥沙调控率均呈下降趋势;相近雨量时,随着雨强的

增加,径流调控率和泥沙调控率明显下降。

(4)7类小区的降雨量和产流量、产流量和产沙量之间呈现显著正相关。在裸地、黄刺玫及草地小区, I_{30} 与产流量之间均无显著相关。在裸地、油松、黄刺玫、耕地小区, I_{30} 和产沙量之间无显著相关。

参考文献:

- [1] 李锐.中国水土流失基础研究的机遇与挑战[J].自然杂志,2008,30(1):6-11.
- [2] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J].Catena,2010,81(2):97-103.
- [3] 汪邦稳,肖胜生,张光辉,等.南方红壤区不同利用土地产生产沙特征试验研究[J].农业工程学报,2012,28(2):239-243.
- [4] 余冬立,邵明安,薛亚锋,等.坡面土地利用格局变化的水土保持效应[J].农业工程学报,2011,27(4):22-27.
- [5] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域坡地不同利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.
- [6] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产生产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.
- [7] 何杨洋,王晓燕,段淑怀.密云水库上游流域次降雨坡面产生产沙特征[J].农业工程学报,2015,31(24):134-142.
- [8] 李京京,吕哲敏,石小平,等.基于地形梯度的汾河流域土地利用时空变化分析[J].农业工程学报,2016,32(7):230-236.
- [9] 孟宪文,薛占金.汾河流域2010年土地退化成因分析及经济损失估算[J].山西大学学报(自然科学版),2014,37(1):148-152.
- [10] 韩丽君,李晶.近10年汾河流域植被覆盖时空变化研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2017,48(6):824-831.
- [11] 赵颖,党晋华,王飞.汾河流域水系和表层沉积物中多环芳烃的空间变化规律及其生态风险研究[J].生态毒理学报,2017,12(3):579-596.
- [12] 侯志华,马义娟.黄土高原汾河流域地表景观演变特征研究[J].水土保持研究,2013,20(2):93-99.
- [13] 苏常红,王亚璐.汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素[J].生态学报,2018,38(22):7886-7898.
- [14] 张凯,吴斌,秦作栋,等.基于SWAT模型的汾河上游径流过程模拟研究[J].山西大学学报(自然科学版),2013,36(3):491-496.
- [15] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J].Transaction American Geophysical Union,1958,39(2):285-291.
- [16] Francesco G, Carollo, Maria A, et al. Characterizing rainfall erosivity by kinetic power-Median volume diameter relationship[J].Catena,2018,165(4):12-21.
- [17] Nikolaos E. Evaluating the performance of different empirical rainfall erosivity (R) factor formulas using sediment yield measurements [J]. Catena, 2018, 169(10):195-208.
- [18] Ju-Young S, Taereem K, Jun-Haeng H, et al. Spatial and temporal variations in rainfall erosivity and erosivity density in South Korea[J].Catena,2019,176(5):125-144.
- [19] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等.珠江流域1960-2012年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159-164.
- [20] 刘春利,杨勤科,谢红霞.延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J].环境科学,2010,31(4):850-855.
- [21] Soksamngang K,何洪鸣,赵宏飞,等.黄土高原50余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-7.
- [22] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [23] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等.1960—2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].地理研究,2013,32(2):245-256.
- [24] 王萍,王克勤,李太兴,等.反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J].应用生态学报,2011,22(5):1261-1267.
- [25] 马岚,黄生志,黄强,等.渭河流域降雨与降雨侵蚀力变化的原因分析[J].水土保持学报,2018,32(1):174-189.
- [26] 杨波,王全九,郭思琪.1988—2013年陕北风沙区秃尾河流域土壤侵蚀时空变化特征[J].中国水土保持科学,2018,16(4):56-65.
- [27] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报1996,16(5):1-20.
- [28] 贾志军,王小平,李俊义,等.晋西黄土高原降雨侵蚀力研究(续) [J].中国水土保持,1991(2):18-22.