

佳芦河流域特大暴雨洪水对下垫面治理的响应

冉大川^{1,3}, 齐斌², 肖培青^{1,3}, 焦鹏^{1,3}

(1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 黄河水利委员会 黄河中游水文水资源局, 山西 晋中 030600; 3. 水利部 黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003)

摘要:根据实测水文资料,从下垫面治理入手,对佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水进行了实地调查和成因分析。采用回归分析方法分析了流域洪水泥沙关系和汛期降雨产流关系及其变化,采用“指标法”计算了流域水土保持措施减洪减沙量,并分析了水土保持措施减沙能力和植被措施对流域洪水泥沙的削减作用。结果表明:(1)“2012-7-27”暴雨的雨量、雨强和笼罩面积都很大,但洪峰流量、最大含沙量、洪水量和洪水输沙量却明显减小;流域汛期降雨产流关系具有明显的分区特征,以场次洪水对应的面平均雨量为参数,可以分为暴雨区、大雨区和一般降雨区等 3 个区。(2)流域水土保持措施削洪减沙作用十分明显。“2012-7-27”暴雨中水土保持措施减洪减沙效益分别达到 26.8% 和 38.3%,其中坝地减洪减沙所占比例最大,分别为 71.0% 和 51.9%,林草等植被措施(包括封禁治理)减洪减沙所占比例其次,梯田减洪减沙所占比例位居第三。(3)植被措施对流域洪水泥沙削减作用显著,但梯田、林地减沙能力均未达到其最大减沙能力,抵御暴雨洪水的空间仍然很大,草地减沙能力约为其最大减沙能力的 1.8 倍,需要继续加大植被措施建设力度。同时,在流域治理中要继续加大治沟骨干工程建设力度,大力实施“坡改梯”工程。

关键词:暴雨;洪水;下垫面治理;减沙能力;佳芦河

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0007-07

Response of Extraordinary Rainstorm and Flood to the Harnessing for Underlying Surface in Jialu River Basin

RAN Dachuan^{1,3}, QI Bin², XIAO Peiqing^{1,3}, JIAO Peng^{1,3}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. Bureau of Hydrology and Water Resources in the Middle Reaches of the Yellow River, Yellow River Conservancy Commission, Jinzhong, Shanxi 030600, China; 3. Key Laboratory of the Loess Plateau Soil Erosion and Water Loss Process and Control, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: According to the measured hydrological data and the field survey, the factors analysis of ‘2012-7-27’ rainstorm and flood in Jialu River Basin was done based on the harnessing of underlying surface. The relationship of the flood and sediment and the relationship of the rainfall and the runoff in the flood season and its changes of the watershed were analyzed using regression analysis. The flood and sediment reduction of the soil and water conservation measures was calculated using the index method. The ability of soil and water conservation measures on reducing the sediment and the reduction effect of vegetation measures on the flood and sediment of the watershed were analyzed. The results showed that: (1) ‘2012-7-27’ rainstorm rainfall, rainfall intensity and the coverage area were great, but the peak flow, maximum sediment concentration, the amount of flood and flood sediment load significantly reduced; the relationship of the rainfall and runoff of basin had obvious regional features, three zones of rainstorm areas, heavy rain areas and normal rainfall areas were divided corresponding to the average region rainfall related to the flood; (2) the effect of the soil and water conservation measures on reducing the flood and sediment was very obvious, the reduction effect of the soil and water conservation measures on the flood and sediment reached 26.8% and 38.3%, respectively, during ‘2012-7-27’ rainstorm. The reduction effect of the dam on the flood and sediment had the largest ratios, reached 71.0% and 51.9%, respectively. The reduction ratio of forest, grass and other vegetation meas-

ures (including closing hillside for afforestation) was the second; the reduction ration of the terrace was the third; (3) the flood and sediment reduction of vegetation measures was significant. The terrace and forest did not reach their maximum capacity of sediment reduction, which have the capability to resisting heavy rain floods. The sediment reduction of grass is about 1.8 times of the maximum capacity of sediment reduction, therefore, the vegetation measures need to be increased. Meanwhile, the key projects of controlling gully in the watershed should increase; the ‘terrace on the slope’ project should be carried out widely.

Keywords: rainstorm; flood; harnessing for underlying surface; sediment reduction; Jialu River Basin

近年来,黄河中游干流及支流实测径流量和输沙量持续大幅度减少,引起多方高度关注。搞清黄河中游水沙剧变成因,阐明水土保持措施对水沙剧减的贡献程度,分析暴雨条件下来水来沙对近期水土保持措施综合治理的响应关系,对于评价未来尤其是极端气候条件下黄河水沙变化情势具有重要意义。而近期流域暴雨洪水对下垫面治理的响应和不同水土保持措施减洪减沙能力分析是黄河中游水沙变化情势研究中一个非常薄弱的环节。本文通过野外实地调查和资料收集,对佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水特性、汛期降雨产流关系、水土保持措施减洪减沙能力及减洪减沙量、洪水输沙量锐减的下垫面成因等进行了分析和计算,同时分析了流域洪水输沙量减少的水土保持治理措施特征,为进一步研究黄河中游相关流域水土保持措施变化和综合治理对流域水沙变化的影响、开展基于下垫面治理的黄河中游多沙粗沙区暴雨洪水分析奠定了基础。

1 “2012-7-27”暴雨洪水概况

佳芦河发源于陕西省榆林市榆阳区双山乡断桥村,由西北向东南流至榆林市佳县佳芦镇木厂湾村后注入黄河,干流长 93 km,沟道平均比降 6.28‰,流域面积 1 134 km²。出口水文站为申家湾水文站,控制面积 1 121 km²。佳芦河地处黄土高原毛乌素沙漠南缘,流域地貌类型绝大部分属黄土丘陵沟壑区,梁峁起伏,沟壑纵横,沟壑密度 3.24 km/km² [1]。

2012 年 7 月 26 日 16 时至 27 日 14 时,黄河中游山(西)陕(西)区间部分地区突降中到大雨,局部地区降暴雨到大暴雨。佳芦河申家湾站最大 12 h、最大 6 h 和最大 4 h 降雨量分别高达 221.2 mm,211.2 mm

和 108.6 mm,40 min 降雨量达 86.4 mm,均为该站有记录以来最大降水。由于佳芦河流域多年平均降水量为 395.1 mm,本次一天之内的降雨相当于流域半年多的降雨。佳芦河出现 1971 年以来最大洪水过程,实测最大洪峰流量 1 820 m³/s。7 月 27 日 20 时至 28 日 8 时,山陕区间北部再次出现较强降水过程,局部地区降暴雨,个别站降大暴雨。暴雨中心位于秃尾河、佳芦河下游和无定河的上中游以及窟野河口至佳芦河口的黄河干流两岸,暴雨笼罩面积约 1 万 km²。其中佳芦河支流金明寺川金明寺站最大 6 h 降雨量达 87.2 mm,由于前后两次暴雨洪水叠加,洪峰接踵而至,实测最大洪峰流量 2 010 m³/s。根据张利娜^[2]等的研究,来自孟加拉湾和南海的暖湿气流,为黄河中游“2012-7-27”暴雨的形成提供了充足的水汽条件并产生了明显的水汽辐合;热力对流对该次暴雨的形成起到了重要作用。

在佳芦河“2012-7-27”暴雨洪水中,佳县受灾群众达十余万人,直接经济损失约 4.5 亿元。主要的水土保持工程措施淤地坝水毁严重,该次暴雨共水毁淤地坝 748 座,其中大型淤地坝 79 座,中型淤地坝 277 座,小型淤地坝 392 座,直接经济损失 1.4 亿元。

2 暴雨洪水泥沙特点

根据调查统计,佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水特征值见表 1。高亚军^[3]等的分析表明,佳芦河流域“2012-7-27”暴雨中心雨量和最大 2 h 雨量均为有资料记载以来的最大值。另据历史资料统计^[4],1970 年 8 月 2 日佳芦河流域也曾普降大暴雨,流域面平均降雨量达 127 mm,而本次暴雨流域面平均雨量高达 170.3 mm,也为有资料记载以来的最大值。

表 1 佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水特征值

次洪量/ 万 m ³	次沙量/ 万 t	最大含沙量/ (kg · m ⁻³)	暴雨中心最大 6 h 雨量/mm	面平均 雨量/mm	最大洪峰 流量/(m ³ · s ⁻¹)
6040	1640	784	211.2	170.3	2010

2.1 洪水泥沙关系分析

佳芦河流域历年最大洪峰流量大于 1 000 m³/s 变化柱状图及对应的洪水量与洪水输沙量关系分别见

图 1 和图 2,不同时段洪水泥沙关系见图 3。根据统计,在 1958—2012 年资料系列中最大洪峰流量大于 1 000 m³/s 的洪水共有 16 场,“2012-7-27”洪水最大

洪峰流量 $2\,010\text{ m}^3/\text{s}$,按由大到小排名居第 6 位。由图 2 及图 3 可以看出,无论是与 $Q_m>1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的大洪水还是与历年洪水相比,“2012-7-27”洪水输沙量都明显偏小。根据回归分析(图 2),佳芦河流域 1958—1994 年最大洪峰流量大于 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的场次洪水泥沙线性关系式为:

$$W_{HS}=0.7753W_H-82.395 \quad (1)$$

式中: W_H ——场次洪水量(万 m^3); W_{HS} ——场次洪水输沙量(万 t)。式(1)相关系数为 0.982。“2012-7-27”暴雨洪水量为 6 040 万 m^3 ,带入式(1)计算后得到其对应的洪水输沙量应为 4 600 万 t,但本次暴雨实测洪水输沙量仅为 1 640 万 t,只有计算值的 35.7%,减少了 64.3%。因此,佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水输沙量与历史相同洪水量对应的洪水输沙量相比大为减少。

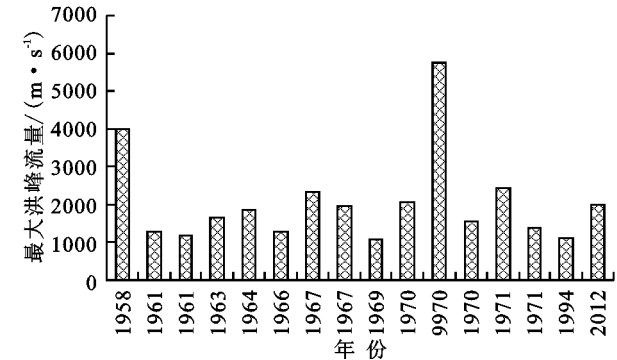


图 1 佳芦河流域最大洪峰流量($Q_m>1\,000\text{ m}^3/\text{s}$)变化

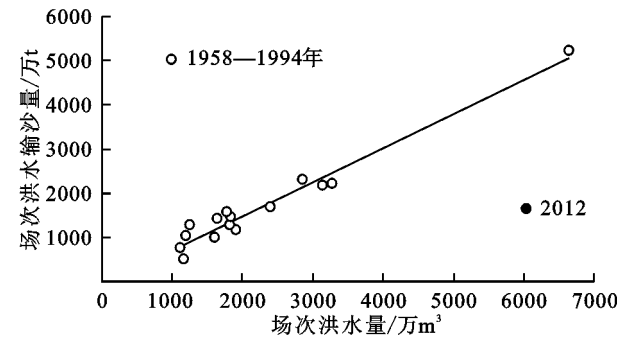


图 2 佳芦河流域场次洪水泥沙关系($Q_m>1\,000\text{ m}^3/\text{s}$)

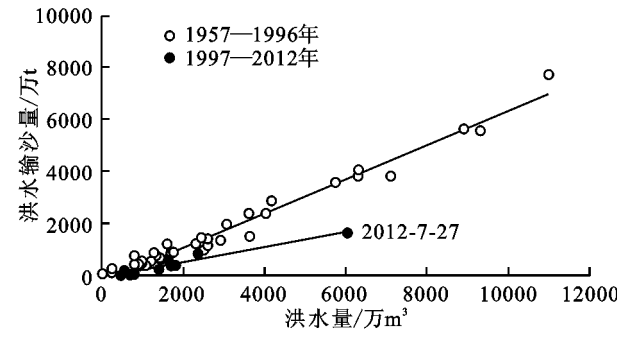


图 3 佳芦河流域不同时段洪水泥沙关系

以黄河中游水土保持生态建设大规模开展的 1997 年为界,基于佳芦河流域下垫面变化,对图 3 显示的关系分两个时段进一步分析,结果表明,1997—

2012 年与 1957—1996 年相比,流域洪水泥沙关系直线斜率变小,说明洪水含沙量减小。这与 1997 年以来流域水土保持综合治理对下垫面的影响有密切关系。通过回归分析,佳芦河流域 1957—1996 年和 1997—2012 年洪水泥沙线性关系式分别为:

1957—1996 年:

$$W_{HS}=0.6592W_H-279.46 \quad (2)$$

1997—2012 年:

$$W_{HS}=0.2966W_H-96.277 \quad (3)$$

式中: W_H ——年洪水量(万 m^3); W_{HS} ——年洪水输沙量(万 t)。(2),(3)两式相关系数分别为 0.989,0.975。

由图 3 及式(2),(3)斜率及截距可以看出,1997 年以来佳芦河流域洪水泥沙关系已经发生变化,值得关注。流域洪水泥沙线性关系式的物理意义是其斜率代表流域洪水期平均含沙量,对比式(2),(3)的斜率可知,佳芦河流域 1957—1996 年洪水期平均含沙量为 $659.2\text{ kg}/\text{m}^3$,1997—2012 年下降为 $296.6\text{ kg}/\text{m}^3$,减小了 55%。从 1994 年以前最大洪峰流量大于 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的 15 场历史洪水最大含沙量来看,其平均值为 $1\,140\text{ kg}/\text{m}^3$,“2012-7-27”洪水最大含沙量仅为 $784\text{ kg}/\text{m}^3$,在 16 场历史洪水中排名最末位(图 4)。因此,与历史大洪水相比,“2012-7-27”洪水含沙量大幅度减小。

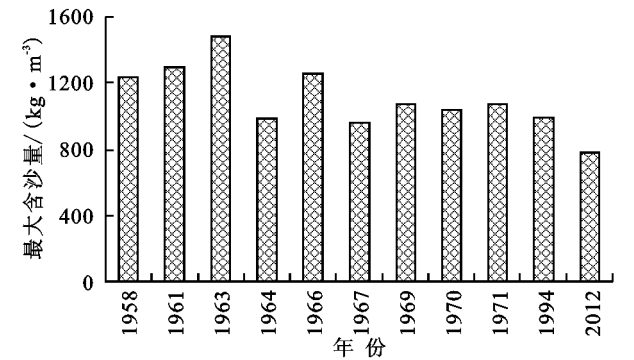


图 4 佳芦河流域特大洪水年份最大含沙量变化

2.2 汛期降雨产流关系分析

根据 1957—2012 年水文资料,点绘佳芦河流域汛期(5—9 月)降雨产流关系见图 5。按照发生洪水时降雨量的大小,佳芦河流域汛期降雨产流关系以场次洪水对应的面平均雨量为参数,可以分为 3 个区,即暴雨区、大雨区和一般降雨区。其中暴雨区场次洪水对应的面平均雨量 $P_c\geq 50\text{ mm}$;大雨区场次洪水对应的面平均雨量 P_c 取值为 $25\text{ mm}\leq P_c<50\text{ mm}$;一般降雨区场次洪水对应的面平均雨量 $P_c<25\text{ mm}$ 。通过回归分析,佳芦河流域 3 个区汛期降雨产流关系式分别为:

暴雨区:

$$W_H=31.987P_X-3755.8 \quad (4)$$

大雨区:

$$W_H = 21.985P_X - 3683.4 \quad (5)$$

一般降雨区:

$$W_H = 5.465P_X - 206.7 \quad (6)$$

式中: W_H ——年洪水量(万 m^3); P_X ——流域汛期降雨量(mm)。(4),(5),(6)三式相关系数分别为 0.991, 0.984, 0.637。

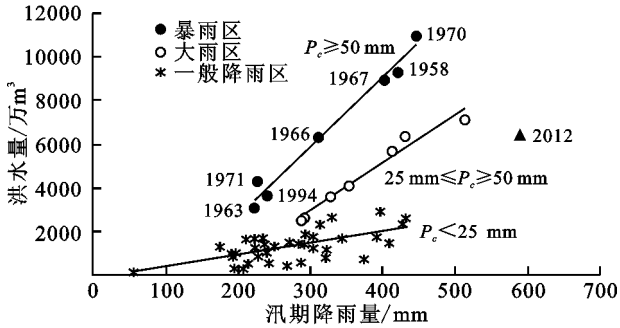


图 5 佳芦河流域汛期降雨产流关系

由此可见,当佳芦河流域汛期发生高强度暴雨或大暴雨时,其降雨量与流域产洪量具有非常密切的线性正相关关系,暴雨越大,产洪量越大。暴雨区单位毫米暴雨产洪量(即暴雨区线性关系式斜率)高达 32 万 m^3/mm 。2012 年虽然发生了“2012-7-27”暴雨洪水,但 2012 年点据却在暴雨区右侧,偏离暴雨区较远,说明目前佳芦河流域发生特大暴雨时的降雨产洪关系与以往相比已经发生明显变化,相同汛期降雨对应的产洪量明显减小,这显然与目前流域下垫面的拦蓄作用显著增大密切相关。

对于中等强度的汛期大雨,佳芦河流域汛期降雨产流关系仍为非常密切的线性正相关关系。大雨区

单位毫米降雨产洪量为 22 万 m^3/mm ,比暴雨区绝对值减小 10 万 m^3/mm ,减小了 31.3%。对于一般强度的汛期降雨,佳芦河流域汛期降雨产流线性正相关关系虽然相关性较差,但其相同汛期降雨对应的产洪量却明显小于大暴雨区。根据以上关系式计算,对于相同的汛期降雨(如 400 mm),大雨区的产洪量只有暴雨区的 56.5%,一般降雨区的产洪量仅分别为暴雨区和大雨区的 21.9%和 38.7%。由于流域一般降雨区的降雨产流关系相对比较散乱,说明其影响因素较为复杂。

根据以上对比分析,佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水特点是:暴雨量大,雨强大,笼罩面积大;洪峰流量、最大含沙量、洪水量和洪水输沙量明显减小;1997 年以来的洪水泥沙关系已有明显变化。

3 水土保持措施减洪减沙量计算

3.1 水保措施保存面积核实

本次研究通过历时半个月的典型调查,在广泛收集佳芦河流域水利水保措施年报等资料的基础上,采用卫星遥感资料修正、抽样调查、与第一次全国水利普查公报数据核对等多种途径,核对了流域截至 2012 年底的水保措施保存面积(表 2)。水保措施配置比指某一单项水土保持措施保存面积与水土保持措施总保存面积之比。佳芦河流域 2006 年与 2012 年水保措施配置比计算结果见表 2,水保措施配置比变化过程见图 6。由此可见,2012 年底水保措施累积保存面积比 2006 年底增加了 57.3%,年均治理进度达到 9.6%。

表 2 佳芦河流域水保措施保存面积核实结果

年份	梯(条)田/ hm^2	林地/ hm^2	草地/ hm^2	坝地/ hm^2	封禁治理/ hm^2	合计/ hm^2
2006	10311	29874	7605	1259	722	49771
2012	19050	44586	11102	2046	1498	78282

由配置比计算结果来看,2012 年与 2006 年相比,佳芦河流域梯田、坝地和封禁治理配置比均呈上升趋势,其中梯田配置比上升 17.4%,坝地配置比上升 4.0%,封禁治理配置比上升 26.7%。但林草措施配置比均呈下降趋势,其中林地配置比下降 5.0%,草地配置比下降 7.2%。总体而言,佳芦河流域工程措施(梯田和坝地)配置比上升,封禁治理配置比上升最为明显;林草措施配置比则有所下降。水保措施配置比的变化对流域水土保持措施减洪减沙作用的充分发挥将产生重要影响,有待进一步深入研究。

3.2 水保措施减洪减沙量计算与分析

采用“指标法”计算佳芦河流域 2012 年水土保持措施减洪减沙量。根据“十一五”国家科技支撑计划

重点课题第四专题“黄河中游水沙变化成因分析”1997—2006 年研究成果^[5],求得佳芦河流域近期水土保持措施减洪减沙指标,计算流域 2012 年水土保持措施减洪减沙量(表 3)。

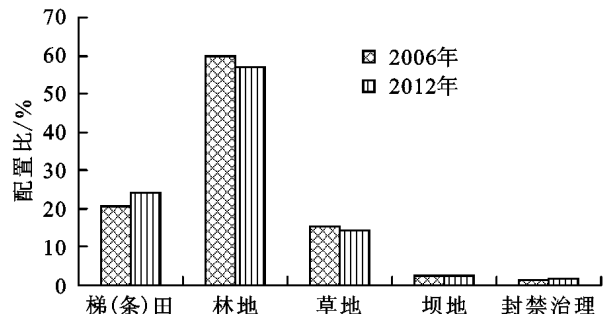


图 6 佳芦河流域水保措施配置比变化对比

表 3 佳芦河流域 2012 年水土保持措施减洪减沙量计算结果

计算指标	梯(条)田	林地	草地	坝地	封禁治理	合计
减洪指标/(万 m ³ ·hm ⁻²)	0.0129	0.0081	0.0025	0.7650	0.0028	
减沙指标/(万 t·hm ⁻²)	0.0099	0.0062	0.0020	0.2582	0.0028	
减洪量/万 m ³	246	363	28	1565	4	2206
减沙量/万 t	188	275	22	528	4	1017
减洪所占比例/%	11.1	16.4	1.3	71.0	0.2	100
减沙所占比例/%	18.5	27.0	2.2	51.9	0.4	100

由表 3 计算结果可见,2012 年佳芦河流域水土保持措施减洪 2 206 万 m³,减沙 1 017 万 t,减洪减沙效益分别达到 19.6%和 38.0%。在“2012-7-27”暴雨中水土保持措施减洪减沙效益分别达到 26.8%和 38.3%,水土保持措施的削洪减沙效益十分明显。从各单项水土保持措施减洪减沙所占比例来看,坝地表现最为“抢眼”,减洪减沙所占比例最大,其中减洪所占比例高达 71.0%。虽然流域坝库损毁比较严重,但却依然发挥了十分重要的拦沙作用,减沙所占比例达到 51.9%。林草等植被措施(包括封禁治理)减洪减沙所占比例其次,其中减洪所占比例为 17.9%,减沙所占比例为 29.6%。梯田减洪减沙所占比例位居第三,其中减洪所占比例为 11.1%,减沙所占比例为 18.5%。

3.3 水土保持措施减沙能力分析

定义水土保持单位措施面积最大减沙量为水土保持措施减沙能力。根据以往对黄河中游地区水土保持径流小区资料的分析,梯田、林地、草地等坡面水土保持措施具有不同的拦蓄作用。当坡地径流深较小时,径流基本上都被拦蓄;随着径流深的增加,各种曲线都存在一个极限值,即存在某种措施的最大拦蓄径流的能力,亦即最大填洼深度。小区牧草拦蓄的最大径流深约为 5~15 mm,林地拦蓄的最大径流深约为 20~40 mm,水平梯田拦蓄的径流深最大可达 70 mm。坡面水土保持措施拦减洪水必然减少洪水输沙量。小区牧草的减沙作用最大约为 17 000 t/km²,林地为 26 000 t/km²,水平梯田可达 28 000 t/km²,此即黄河中游坡面措施的最大减沙能力。一般来说,大面积上坡面措施的最大减沙能力要比小区值低 20%左右^[6]。

根据以往研究,梯田的减沙能力随着梯田面积的增加而增大,但减沙能力存在一个上限。根据水利部第二期黄河水沙变化研究基金资助项目“河龙区间水土保持措施减水减沙作用分析”研究成果,河龙区间小区一类梯田的减沙能力最大可以达到 25 000 t/km²,减沙效益可达 86%;二类梯田的减沙能力最大约为15 000 t/km²,减沙效益在 70%左右;三类梯

田的减沙能力最大只有 5 000 t/km²,减沙效益在 50%左右。同时,不同产流产沙水平下不同质量的林地减沙水平不同;林地的减沙能力不仅与林地的覆盖度有关,而且与产流产沙水平有关;随着产流产沙量的增大,林地的减洪减沙量增大,当增大到一定的极限以后不再变化。覆盖度为 90%时,小区林地的最大减沙能力可以达到 27 000 t/km²;覆盖度为 60%时,小区林地的最大减沙能力为 18 000 t/km²;覆盖度为 30%时,小区林地最大减沙能力只有 5 000 t/km²。草地减洪减沙不仅与草地质量有关,而且与对照区的产流产沙水平有关。盖度为 70%时,小区草地的最大减沙能力可达 2 800 t/km²;盖度为 50%时,最大减沙能力可达 1 400 t/km²;当盖度为 35%时,最大减沙能力只有 650 t/km²,减沙能力较差^[7]。

水土保持措施减沙指标定义为某一时段单位措施面积减沙量,一般为一常数。显然,水土保持措施减沙指标一般小于其减沙能力。由于水土保持措施减沙能力与减沙指标密切相关,为简化研究问题,本次研究把表 3 中确定的佳芦河流域减沙指标作为其减沙能力。由此可知,佳芦河流域 2012 年梯田、林地、草地减沙能力分别为 99,62,20 t/hm²。本次调查中看到,佳芦河流域梯田质量普遍较好,可按一类梯田考虑;根据计算,佳芦河流域植被覆盖度为 50.4%。按照上述河龙区间小区不同类别、不同覆盖度的坡面措施最大减沙能力折减 20%计算,则佳芦河流域梯田最大减沙能力为 200 t/hm²,林地、草地最大减沙能力分别为 95, 11.2 t/hm²。显然,在“2012-7-27”暴雨洪水中佳芦河流域梯田减沙能力远未达到其最大减沙能力 200 t/hm²,抵御暴雨洪水的空间仍然很大;林地减沙能力也只有其最大减沙能力的 65.3%,也未达到其最大减沙能力。但草地减沙能力却是其最大减沙能力的 1.786 倍,已经超出其最大减沙能力,需要继续加大植被措施建设力度。

3.4 植被措施对流域洪水泥沙削减作用分析

植被措施对流域产流产沙具有明显的影响。根据黄河中游泥沙主要来源区 10 个代表流域(区域)

1960—1984 年资料^[8],统计植被覆盖率与产流产沙特征值,通过回归分析,得到植被覆盖率与径流深和输沙模数的负指数关系式分别为:

$$y_1 = 36.298e^{-0.0047x} \quad (7)$$

$$y_2 = 17709e^{-0.0439x} \quad (8)$$

式中: y_1 ——流域多年平均径流深(mm); y_2 ——流域多年平均输沙模数[t/(km²·a)]; x ——流域平均植被覆盖率(%)。(7),(8)两式相关系数分别为 0.825,0.908。由此说明,在黄河中游泥沙主要来源区,流域产流产沙尤其是产沙与流域植被覆盖率(林率)之间具有很好的非线性负指数关系(图 7 和图 8)。据此,只要知道植被覆盖率的变化,便可求得径流泥沙的变化。由式(7),(8)可以估算植被覆盖率与减水减沙作用的定量关系:若植被覆盖率提高 1%,减水率可以提高 0.5%,减沙率可以提高 4.3%。

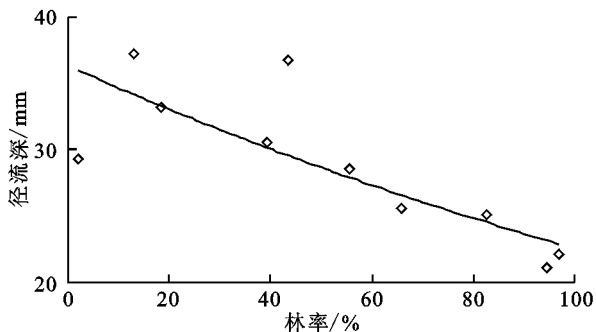


图 7 黄河中游植被覆盖率与径流深关系

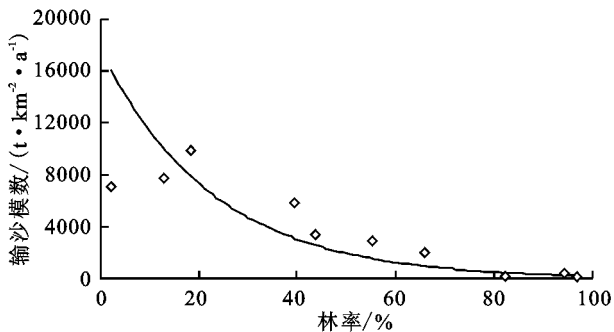


图 8 黄河中游植被覆盖率与输沙模数关系

由图 7 可以看出,随着植被覆盖率的增大,流域产流量(径流深)明显减小。即使植被覆盖率超过 90%,流域产流量依然呈减小趋势。由图 8 可以看出,随着植被覆盖率的增大,流域产沙量(输沙模数)减小趋势更为明显,但植被覆盖率超过 60%以后,流域产沙量减小趋势明显变缓,植被覆盖率超过 70%以后流域产沙量趋于稳定。显然,随着植被覆盖率的增大,流域产沙量的变化存在着明显的临界现象,即当流域植被覆盖率>70%时,植被覆盖率对流域产沙量的影响不大,而一旦流域植被覆盖率<60%,随着植被覆盖率的减小,流域产沙量明显增加;当流域植被覆盖率<30%时,随

着植被覆盖率的减小,流域产沙量迅速增大,这与卢金发^[9]等的分析结论基本一致。因此,植被覆盖率达到 70%可以作为黄河中游泥沙主要来源区流域产沙量趋于稳定的植被覆盖率阈值。

根据表 2 水保措施面积核实结果,2012 年佳芦河流域植被(包括林草措施及封禁治理)覆盖度(植被措施核实面积/流域面积×100%)为 50.4%,与 2006 年相比植被覆盖度增加了 16.7%,则其减水率可以提高 8.4%,减沙率可以提高 71.8%。因此,佳芦河流域植被措施在“2012-7-27”暴雨中对来自坡面的洪水泥沙削减作用非常显著。同时,由于佳芦河流域植被覆盖度为 50.4%,与流域产沙量趋于稳定的植被覆盖度阈值 70%尚有约 20%的差距,故该流域继续通过水土保持生态工程建设以提高植被覆盖度、从而实现持续减沙的空间很大,植被措施与工程措施相结合依然是最为有效的减沙措施配置模式。水土保持植被措施和工程措施等人类活动不仅影响到流域产流产沙等水文过程,还将改变流域的植被状况并影响流域的产流机制,进而直接影响流域综合治理的效果。因此,进一步开展人类活动影响下的流域生态水文过程演变研究必要而迫切^[10]。

4 洪水输沙量减少的水土保持治理措施特征

佳芦河流域水土保持措施在 2012 年 7 月暴雨洪水中的削洪减沙效益十分明显,既说明黄河中游地区在 1997 年以来持续大规模治理背景下,近期水土保持措施的削洪减沙能力有了明显提高,也与近期流域下垫面出现的一些新的变化特征密切相关。兹阐述如下:

(1) 梯田。从佳芦河流域梯田建设情况看,近期建设规模较大。由表 2 可知,2012 年流域梯田保存面积比 2006 年增加了 84.8%,梯田配置比达到 24.3%,因此,佳芦河流域梯田在“2012-7-27”暴雨中发挥了较大的拦蓄作用。

(2) 淤地坝。根据本次调查统计,佳芦河流域截至 2012 年底共计建设淤地坝 3 913 座,其中骨干坝 202 座,中型坝 1 765 座,小型坝 1 946 座;1990 年以后新建骨干坝 20 座,控制面积比(骨干坝控制面积之和/流域水土流失面积×100%)10.7%,总库容 0.339 亿 m³。其中地处“2012-7-27”暴雨区的中小淤地坝绝大多数建于 20 世纪 70 年代和 80 年代初期,到 90 年代中后期已基本淤满。但 2003 年以来新建的淤地坝大多数淤积缓慢,至今也未淤满。根据本次现场调查和

统计,有 30%左右的骨干坝蓄水运用。由于佳芦河流域“2012-7-27”暴雨核心区基本上为 2003 年以来流域淤地坝建设密度最大的地区,因此,数量庞大的淤地坝群(系)在本次暴雨中削减洪峰、拦沙减蚀的作用非常突出,减洪减沙所占比例最大。

(3) 植被。1997 年以来,黄河中游地区由于退耕还林、生态修复和封禁治理等措施的实施,植被恢复速度明显加快。就佳芦河流域而言,近期植被变化也非常明显。根据表 2 结果,2012 年佳芦河流域植被覆盖度为 50.4%,与 2006 年相比植被覆盖度增加了 16.7%。根据抽样调查,2012 年 7 月暴雨前佳芦河流域植被平均郁闭度(植被叶冠垂直投影面积与植被面积之比)为 0.49,根据联合国粮农组织规定,郁闭度在 0.70(含 0.70)以上为稠密植被,郁闭度在 0.20~0.69 之间为中度植被,郁闭度在 0.20(不含 0.20)以下为稀疏植被。因此,佳芦河流域已达到中度植被的郁闭度水平,植被措施在本次暴雨中的拦蓄作用如此明显是因有充分的覆盖度和郁闭度作基础,其减洪减沙所占比例仅次于淤地坝并非偶然。

5 结 论

(1) 佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水特点是暴雨量大,雨强大,暴雨笼罩面积大;洪峰流量、最大含沙量、洪水量和洪水输沙量明显减小。流域汛期降雨产流关系可以分为 3 个区,即暴雨区、大雨区和一般降雨区,具有明显的分区特征。其中暴雨区场次洪水对应的面平均雨量 $P_c \geq 50\text{ mm}$;大雨区 $25\text{ mm} \leq P_c < 50\text{ mm}$;一般降雨区 $P_c < 25\text{ mm}$ 。

(2) 2012 年佳芦河流域水土保持措施减洪 2 206 万 m^3 ,减沙 1 017 万 t,减洪减沙效益分别达到 19.6%和 38.0%。在“2012-7-27”暴雨中水土保持措施减洪减沙效益分别达到 26.8%和 38.3%。水土保持措施的削洪减沙效益十分明显。

(3) 佳芦河流域“2012-7-27”暴雨洪水中坝地减洪减沙所占比例最大,分别高达 71.0%和 51.9%;林草等植被措施(包括封禁治理)减洪减沙所占比例其次,分别为 17.9%和 29.6%;梯田减洪减沙所占比例位居第三,分别为 11.1%和 18.5%。植被措施对流域洪水泥沙削减作用显著。与 2006 年相比流域植被覆盖度增加 16.7%,减水率提高 8.4%,减沙率提高 71.8%。

(4) 在“2012-7-27”暴雨中佳芦河流域梯田、林地减沙能力均未达到其最大减沙能力,抵御暴雨洪水的空间仍然很大;但草地减沙能力却是其最大减沙能力的 1.786 倍,已经超出其最大减沙能力,需要继续加大植被措施建设力度。

参考文献:

- [1] 田永宏,张庆伟,马生祥.佳芦河流域水土保持措施减水减沙效益分析[J].中国水土保持,1996(6):22-25.
- [2] 张利娜,张荣刚,李殊,等.黄河中游“7·27”暴雨过程的物理量诊断分析[J].人民黄河,2013,35(6):15-17.
- [3] 高亚军,朱世同,金双彦.佳芦河流域“7·27”暴雨洪水浅析[J].人民黄河,2013,35(6):23-24.
- [4] 徐建华,李晓宇,陈建军,等.黄河中游河口镇至龙门区间水利水保工程对暴雨洪水泥沙影响研究[M].郑州:黄河水利出版社,2009.
- [5] 冉大川,左仲国,吴永红,等.黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应[M].北京:科学出版社,2012.
- [6] 冉大川,李占斌,李鹏,等.大理河流域水土保持生态工程建设的减沙作用研究[M].郑州:黄河水利出版社,2008.
- [7] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [8] 唐克丽,熊贵枢,梁季阳,等.黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M].北京:中国科学技术出版社,1993.
- [9] 卢金发,黄秀华.黄河中游地区流域产沙中的地貌临界现象[J].山地学报,2004,22(2):147-153.
- [10] 杨大文,雷慧闽,丛振涛.流域水文过程与植被相互作用研究现状评述[J].水利学报,2010,41(10):1142-1149.