

孔兑流域产沙关系浅析

侯素珍^{1,2}, 郭彦^{1,2}, 李婷^{1,2}

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究所, 郑州 450003; 2. 水利部黄河泥沙重点实验室, 郑州 450003)

摘要: 十大孔兑的洪水泥沙对孔兑下游安全极其不利, 同时造成黄河干流严重淤堵。研究孔兑产沙关系及其变化对于流域治理规划、合理评价径流泥沙变化趋势具有重要意义。利用实测水文泥沙资料, 结合十大孔兑流域综合治理的发展, 以流域治理前和治理后相对稳定期为对比年份, 以日降雨量大于 10、25 mm 的累计降雨量和年输沙量为参数, 建立了有水文资料的毛不浪、西流沟和罕台川 3 条孔兑不同时期降雨—产沙的关系, 说明了下垫面变化对产沙关系的巨大影响。分析表明, 在降雨量相近的情况下, 近期输沙量较基准期减少约 90%, 多年平均有效降雨条件下, 3 孔兑的减沙比 93%~98%。研究表明孔兑大规模治理、植被恢复和淤地坝建设, 对孔兑输沙量锐减发挥了重要作用。研究成果可对评估孔兑流域综合治理措施的效果提供重要依据。

关键词: 孔兑; 降雨—产沙关系; 减沙比; 相关性分析

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)01-0066-06

Analysis on the Relationship of the Sediment Yield in Tributary Basin

HOU Suzhen^{1,2}, GUO Yan^{1,2}, LI Ting^{1,2}

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Yellow River Sediment Research, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The flood and sediment of ten tributaries are extremely unfavorable to the safety of the lower reaches, and cause serious lifting silt in the main Yellow River. The study on the relationship of sediment yield and changes is very important for watershed management planning and reasonable evaluation of runoff and sediment trend. Based on the measured hydrological and sediment data, combining with the development of comprehensive treatment of ten tributaries basin, taking the relative stable period of before and after treatment as comparison years, the cumulative rainfall and annual sediment discharge when daily rainfall is more than 10 mm and 25 mm as parameters, we set up the relationship between rainfall and sediment yield of different periods of Maobulang, Xiliugou and Hantaichuan. The result shows that there is great influence of underlying surface variation on sediment yield. The analysis shows that the recent sediment discharge is reduced by about 90% than the base period in the case of similar rainfall, and the reductions of specific sediment yield of three tributaries are between 93% and 98% under the annual average effective rainfall condition. The results show that the large-scale treatment, vegetation restoration and check dam construction play important role in reducing sediment in the basin. The research results can provide an important basis for evaluating the effect of watershed comprehensive management measures.

Keywords: tributary; rainfall and sediment yield relationship; reduction of specific sediment yield; correlation analysis

黄河上游内蒙古段的三湖河口—头道拐河段全长 299.7 km, 这一河段的冲淤变化, 不仅受干流来水来沙的影响, 更受来自南岸并行入黄的十大孔兑(“孔兑”, 蒙语即“山洪沟”)的影响。十大孔兑是内蒙古河段的主要产沙支流, 多年平均输沙量 2 300 万 t^[1], 常

以高含沙洪水形式汇入干流, 不但在孔兑下游泛滥成灾, 也经常在干流形成沙坝, 造成黄河干流严重淤堵, 泥沙淤积导致河床抬高。目前, 与十大孔兑相关的内蒙古河道淤积问题研究较多, 如刘晓燕^[2]、师长兴^[3]、冉立山^[4]等分别对内蒙古河段主槽萎缩原因、河床冲

淤演变特征及原因、头道拐断面形态变化及其对水沙的响应等进行了研究;侯素珍^[5]研究提出了孔兑对干流淤积的影响以及临界输沙量,王平等^[6]对十大孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性进行了研究。刘韬等^[7]、李璇^[8]对西柳沟流域暴雨产流产沙关系、水沙流失特点及治理措施等进行了研究,刘通等^[9]分析了气候变化与人类活动对西柳沟流域入黄水沙过程的影响,并根据西柳沟土地利用变化数据直接给出了水土保持生态工程建设的蓄水减沙量。冉大川等^[10]通过归因分析,定量评价降雨和下垫面等驱动因子对流域水沙变化的贡献率。近 10 a 孔兑输沙量从 2000 年前的约 2 300 万 t 锐减至约 260 万 t^[1],孔兑流域的综合治理对暴雨洪水产沙过程产生了较大影响,但是,目前对孔兑的产沙关系研究尚少,本文通过对实测资料统计分析,建立水沙参数间的定量关系,探求流域产沙的变化规律,对于评价孔兑综合治理的减沙效果,预估径流泥沙变化趋势、以及进一步的综合治理具有重要意义。

1 研究区概况

十大孔兑为黄河上游的 10 条一级支流,由南向北并行流入黄河,自西向东依次分别为毛不浪沟、卜尔色太沟、黑赖沟、西柳沟、罕台川、壕庆河、哈拉川、母花沟、东柳沟和呼斯太河(图 1),其总流域面积约 10 767 万 km^2 ,生态环境十分脆弱。孔兑上游属黄土丘陵沟壑区,地表覆盖有极薄的风沙残积土,颗粒较粗,下伏地层有大面积砒砂岩出露,极易遭受侵蚀;中游有库布齐沙漠横贯东西,当洪水流经沙漠河段时,含沙量进一步增大;下游为冲积平原,地势平坦,河槽宽浅,易于泥沙淤积。两岸的流沙在风季被带入沟内,暴雨期易形成含沙量高的洪水进入黄河,突发性地淤积在黄河主河道内,形成水下沙坝堵塞黄河,抬高沙坝上游水位,影响两岸防洪和生产安全。山洪灾害是十大孔兑影响最大的自然灾害,每逢暴雨,导致山洪暴发,洪水挟带泥沙泄入黄河和下游沿

表 1 典型孔兑基本特征

孔兑	流域面积/km ²	河长/km	比降/‰	水文站:控制面积/km ²	资料系列
毛不浪	1499	110.9	3.98	官长井:1241;图格日格:1036	1958—1968,1981—2014
西柳沟	1356	106.3	3.57	龙头拐:1145	1960—2014
罕台川	1030	90.4	5.04	瓦窑:829;红塔沟:603;响沙湾:826	1981—2014

2.2 研究方法

从产流产沙的物理成因出发,选择降雨参数,建立基准年和现状情况输沙量与降雨参数关系,采用水文法分析水土保持减水减沙作用^[14]。考虑到孔兑流域的地貌特点,一般降雨条件对地表侵蚀作用弱而不产沙。根据黄土地区可引起侵蚀的日降雨量标准研

河平原区,造成河道淤堵、河水漫堤、房倒屋塌、农田冲毁、交通中断等灾害^[11],严重制约社会经济发展,导致广大山丘区群众生活贫困。

为了改善十大孔兑上中游水土流失状况,减少对当地及周边地区造成严重危害,从 20 世纪 50,60 年代开始,当地政府就在上游开展了水土保持生态建设,在中游开展了防风固沙林带和引洪淤地工程建设。20 世纪 80 年代以来,先后开展了试点小流域、骨干坝工程、沙棘示范区、罕台川水土保持综合治理、黄土高原水土保持世行贷款项目、沙棘拦沙工程等水土保持项目^[12]。近年来,鄂尔多斯市推行了封山禁牧制度,1999—2012 年,孔兑的草原植被得到明显的恢复,平均覆盖度呈现上升趋势;淤地坝建设也从 1988—2002 年的零星骨干坝建设阶段,发展到 2003 年后的淤地坝工程坝系建设阶段^[13]。

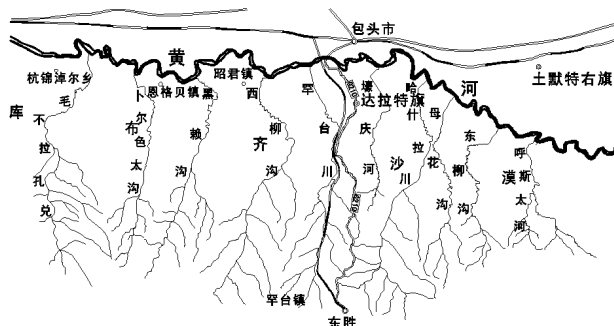


图 1 十大孔兑流域简图

2 数据及研究方法

2.1 资料

十大孔兑中仅西柳沟、毛不浪和罕台川 3 条孔兑各设 1 个水文观测站,降雨量观测除水文站外,西柳沟有高头窑、柴登壕,毛不浪有塔然高勒,罕台川有罕台庙、耳字壕和青达门雨量站。各站设立年份也不同,本文以各水文站和雨量站建站以来到 2014 年的日均降雨、径流和输沙量资料为依据,以输沙量作为产沙量进行分析,3 条孔兑的基本特征见表 1。

究成果将 10 mm 作为临界雨量标准^[15],而比较不同降雨量级和强度对产沙敏感性认为以日降雨大于 25 mm 的年降雨总量作为侵蚀产沙有效降雨量^[16]。本次研究采用日降雨量大于 25 mm 或者 10 mm 的年累计降雨总量(分别用 P_{25} 和 P_{10} 表示)作为降雨参数(即有效降雨),建立年输沙量与降雨量的关系。

基准年选择主要根据流域治理措施的实施程度。孔兑治理分 3 个阶段,1980 年之前孔兑流域植被覆盖较差,可以认为孔兑下垫面条件处于自然状态;1981—2004 年孔兑流域植被覆盖逐渐变好,下垫面发生变化,为植被恢复期;2005 年至今,由于各种措施实施效果的显现,植被覆盖恢复较好,生态环境明显好转。根据孔兑的治理阶段,原则上以 1980 年以前流域水利水保措施数量较少作为基准期,代表“天然情况”,2006 年以来代表现状条件,进行流域人类活动对径流和输沙量影响的水文分析计算。其中不同孔兑由于资料系列的差异,天然时期的代表时段有所不同。

3 结果与分析

3.1 降雨产沙关系

毛不浪沟 1958 年 5 月建站,即位于距入黄口 10.1 km 的官长井水文站,但 1968 年 10 月停测,

1981 年 6 月恢复观测后上移约 30 km 为图格日格水文站。图格日格和官长井站分别位于毛不浪沟穿越库布齐沙漠的上端和下端附近。图 2 为毛不浪沟年输沙量与流域有效降雨量 P_{25} 和 P_{10} 的关系,对比可见,输沙量随降雨量的增加均有增大趋势,但下端的官长井站 1958—1968 年点群散乱,一是由于该时段雨量站只有官长井测站,对流域面而言代表性较差,二是高浓度挟沙洪水经过沙漠区调整后不同洪水过程存在差异。1982 年后雨量站增加到 3 个,水文站位置发生较大变动,相对而言 1958—1968 年关系缺乏可比性,故采用 80 年代治理程度低的资料代表“天然情况”。图 2 表明,1982—1989 年输沙量与降雨量参数具有较好的相关性,相关系数在 0.871~0.907;在 2006 年后林草恢复后的相对稳定期与 80 年代点群呈明显的两个趋势带,点群位于 80 年代的下方,也具有较好的相关性,相关系数达 0.790~0.925,相同降雨条件下近期的输沙量显著减少。

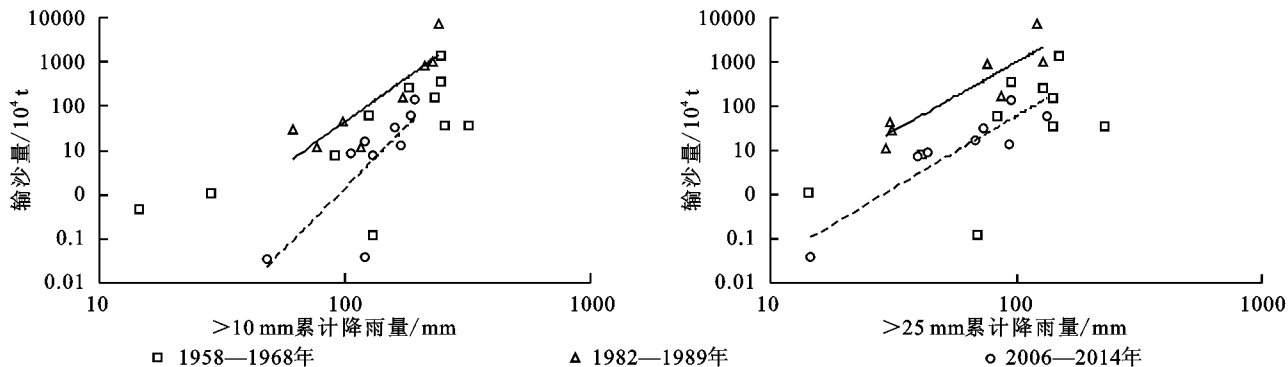


图 2 毛不浪沟年输沙量与特征降雨量的关系

西柳沟 1960 年 4 月设立龙头拐水文站,设站以来位置变动较小,为水文观测资料系列最完整的孔兑。以 1989 年以前作为基准年,建立西柳沟年输沙量与流域降雨量的关系见图 3。可以看出,治理措施稳定显效期和基准期呈明显的两个趋势带,相同降雨条件下治理后的产沙量明显小于治理前基准年,两时期均存在输沙量随降雨量增加而增加的趋势,1960—1989 年基准期的相关系数为 0.711~0.769,2006 年以后点群的相关系数为 0.660~0.735。特别是 P_{25} 小于 100 mm 的情况输沙量差异更大,当 P_{25} 大于一定值后,点群区分不明显。

龙头拐水文站位于孔兑流出库布齐沙漠附近河段,其输沙量的变化不仅受上游黄土丘陵区产沙影响也受沙漠区泥沙补给的影响,输沙量与降雨量的相关程度低于毛不浪孔兑,同时也反映了泥沙来源和输沙沿程调整的复杂性。

罕台川 1980 年 6 月设立瓦窑水文站,1984 年 7 月上移 11.8 km 至红塔沟水文站,1999 年 6 月又下迁 10.1

km 至响沙湾水文站。受资料年限限制,仍以治理程度低的 80 年代作为基准期代表“天然情况”。图 4 为罕台川年输沙量与流域有效降雨量 P_{25} 和 P_{10} 的关系,可以看出,除个别年份外,治理前后呈明显的两个趋势带,治理后点群位于治理前点群下方,相同降雨条件下治理后的产沙量明显小于治理前。其中 1981—1989 年点群的相关系数在 0.570~0.699,2006—2014 年点群的相关系数在 0.760~0.806。

以上分析表明,无论是基准期还是现状条件,输沙量随降雨量的增加而增加趋势明显,但相同降雨量下,现状下垫面条件的输沙量大幅减少。根据上述关系得到各孔兑输沙量 W_s 与 P_{25} 和 P_{10} 关系的经验模型,见表 2。

从各孔兑降雨产沙关系看,其相关程度与水文站位置具有关系。如毛不浪孔兑不同时期关系的分析表明,1958—1968 年由于水文站位置位于沙漠下端与平原交界,含沙水流流经了沙漠区,降雨产沙相关性较差;而 1982 年以后控制断面位于丘陵区的出口,

泥沙来源相对单一,降雨产沙关系良好,也说明了孔兑经过沙漠地区的影响。西柳沟和罕台川的水文站

或位于沙漠出口或沙漠段,其输沙与降雨关系弱化,说明了沙漠地区泥沙交换或补给对输沙的影响。

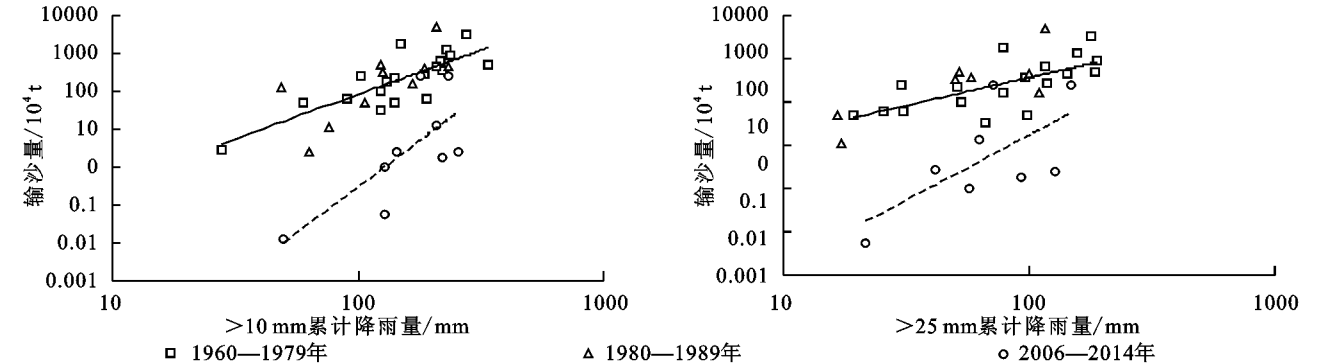


图 3 西柳沟年输沙量与特征降雨量的关系

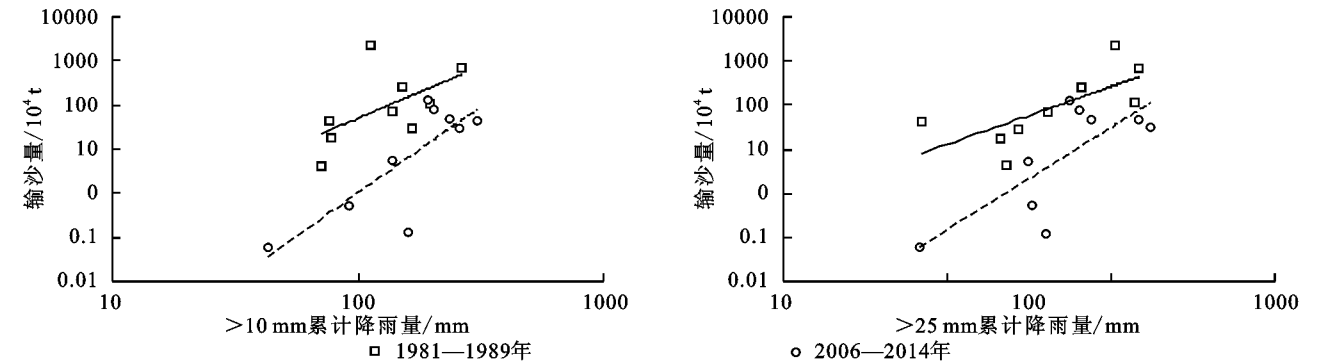


图 4 罕台川年输沙量与特征降雨量的关系

表 2 基准期和现状条件下降雨—泥沙关系

孔兑	时段	关系式: $W_s=k_1P_{10}^{m_1}; W_s=k_2P_{25}^{m_2}$	对应相关系数 R^2
毛不浪	1982—1989	$K_1=5.85\ 10^{-7} m_1=3.940; k_2=0.00052, m_2=3.139$	0.758; 0.823
	2006—2014	$K_1=9.67\ 10^{-12} m_1=5.582; k_2=1.64\ 10^{-5} m_2=3.279$	0.624; 0.856
西柳沟	1960—1989	$K_1=0.000969 m_1=2.466; k_2=0.714 m_2=1.392$	0.589; 0.506
	2006—2014	$K_1=5.72\ 10^{-11} m_1=4.857; k_2=1.73\ 10^{-5} m_2=3.00$	0.540; 0.435
罕台川	1981—1989	$K_1=0.000938 m_1=2.363; k_2=0.632 m_2=1.241$	0.325; 0.488
	2006—2014	$K_1=1.48\ 10^{-8} m_1=3.918; k_2=0.0007 m_2=2.322$	0.649; 0.578

3.2 减沙作用分析

3.2.1 经验模型计算 根据不同孔兑多年平均降雨量,采用表 2 经验模型,计算出相当于治理前“天然情况”和现状下垫面条件的输沙量,依此计算出 3 孔兑多年平均降雨情况下的减沙比,结果见表 3。毛不浪沟按多年平均 P_{10} 和 P_{25} 计算,现状输沙量较基准年将减少 93.5%和 94.2%。根据 2012 年 P_{10} 计算输沙量为 46 万 t,与实测输沙量 62.3 万 t 比较接近。与基准年相比,减沙 91.1%。

按西柳沟多年平均 P_{10} 和 P_{25} 计算,现状输沙量较基准年将减少 98.7%和 96.8%。从实测资料看,2012 年 P_{10} 为 255 mm, P_{25} 为 128 mm,约为多年平均值的 1.6 倍,但实测输沙量仅 2.4 万 t,根据 2012 年 P_{10} 计算输沙量为 28 万 t,证明了治理后产沙量已经大幅度减少。

罕台川按年平均 P_{10} 和 P_{25} 计算,现状输沙量较基准年将减少 95.5%和 91.3%。2012 年罕台川流域 P_{10} 约为 304 mm, P_{25} 为 148 mm,是多年均值的 2 倍,但实测输沙量仅 46.1 万 t;根据 P_{10} 计算输沙量为 76.6 万 t,与实测值比较接近,减沙比 82.5%。证明了治理后产沙量已经大幅度减少。

表 3 平均降雨条件下减沙比

孔兑	多年平均降雨量/mm		减沙比/%	
	P_{10}	P_{25}	范围	平均
毛不浪	154	75	93.5~94.2	93.9
西柳沟	167	79	98.7~96.8	97.8
罕台川	166	74	95.5~91.3	93.4

3.2.2 实测资料对比 根据实测水文资料以及现有雨量站降雨资料统计(表 4),毛不浪孔兑与 1982—1989 年相比,2006—2014 年 P_{25} 基本相当,年均仅增加 1.3%,但实测径流量减少 83.3%,输沙量减少

97.3%;西柳沟 1989 年之前指 1960—1989 年,与该时段相比,2006—2014 年 P_{25} 减少 7.0%,实测径流量减少 56.1%,输沙量减少 90.0%;罕台川与 1981—1989 年相比,2006—2014 年 P_{25} 增加 10.7%,

实测径流量减少 56.1%,输沙量减少 90.6%。总体来看,在降雨量变化较小甚至增加的情况下,径流量减少在 56%以上,输沙量减少在 90%以上,说明流域下垫面的变化对产流和产沙产生极大影响。

表 4 现状年与基准年实测特征值(年均)对比

孔兑	1989 年以前			2006—2014 年			时段变化/%		
	P_{25} /mm	输沙量/万 t	径流量/万 m ³	P_{25} /mm	输沙量/万 t	径流量/万 m ³	P_{25}	输沙量	径流量
毛不浪	63.2	1161.5	2099.4	62.4	31.2	351.6	+1.3	-97.3	-83.3
西柳沟	74.3	575.4	3134.7	69.1	57.7	1377.5	-7.0	-90.0	-56.1
罕台川	64.3	402.1	1393.2	71.2	37.6	611.5	+10.7	-90.6	-56.1

表 4 可见,1989 年以前 3 站年均输沙量为 2 139.0 万 t,而 2006—2014 年 3 站年均输沙量为 126.5 万 t,较 1989 年之前减少约 94.1%;2006—2014 年径流量较 1989 年之前减少约 64.7%。

3.2.3 合理性分析 2000 年以来黄土高原各支流产沙关系均发生了很大变化。罗娅等^[17]通过对黄土高原降雨和植被对产沙影响的研究,提出 2006—2011 年较 1980—1989 年产沙能力下降 59%~98%,产沙变化与植被盖度的相关性较降雨更强,说明相同降雨条件下植被盖度变化对产沙关系的影响更大。从不同区域看,2000—2013 年河口镇—龙门区间、北洛河上游和渭河上游等黄土丘陵沟壑区输沙量减幅高达 80%~90%^[18]。在流域尺度上,黄河龙门、北洛河状头、汾河河津、渭河咸阳和泾河张家山等 5 站以上地区,2010—2013 年林草植被和梯田在多年平均降雨条件下的减沙能力,占潼关以上天然年均来沙量的 60%^[19];2007—2013 年潼关以上淤地坝年均拦沙 1.228 亿 t/a^[20]。皇甫川流域 1980—2010 年水沙急剧减少的原因中,人类活动对流域水沙变化的贡献占 70%^[21],如果考虑现状植被条件,人类活动的贡献将更高。

刘通分析认为^[9],西柳沟年径流与输沙量变化的突变点在 1997 年,突变年前后降雨变化不显著,说明人类活动,特别是水土保持和退耕还林(草)是影响该流域径流泥沙过程变化的主要因素。而冉大川^[10]认为西柳沟 1990—2010 年沙量减少中,降雨和人类活动影响权重之比为 63%:37%,降雨影响占主导地位。实际上 1990—1998 年是流域水土治理发展期,人类活动稳定影响在 2000 年后。

从孔兑的治理过程看,1988 年淤地坝开始建设,2014 年有效淤地坝达 365 座,主要建设在西柳沟、毛不浪沟、罕台川、呼斯太沟等孔兑上,控制面积 884 km²,占上游水蚀面积 19%。从林草措施看,1999 年起,十大孔兑涉及的市(旗)相继颁布禁牧、休牧和轮牧的政策,推进舍饲圈养,落实封山禁牧制度,孔兑生态环境开始明显好转,草原植被得到明显的恢复,平均覆盖度呈

现上涨趋势。根据遥感反演,孔兑上游 1980 年植被覆盖度约为 10%,1998 年约为 16%,到 2014 年超过 40%,植被盖度得到显著的改善。而产沙系数随植被覆盖率增大呈指数减小,黄土丘陵区当植被覆盖率从 10%增至 40%,产沙系数约降低 80%,植被覆盖率达 60%以上时产沙量将很少^[19]。可见,平均降雨条件下植被等水保措施对产沙能力的影响作用占主导地位,近期孔兑植被的稳定好转,对沙量锐减起到决定性作用。孔兑上游属黄土丘陵区,对比分析认为,人类活动对产沙的影响 90%以上的结论基本合理。

4 结论

(1) 各孔兑年输沙量与降雨参数具有较好的幂函数关系,输沙量随降雨量的增大而增加。与代表天然情况的基准年相比,2006—2014 年的降雨—输沙关系发生明显变化,产沙能力显著降低。

(2) 根据降雨—产沙降雨模型计算,平均降雨条件下现状孔兑的减沙能力在 93%以上。2006—2014 年与基准年的对比,孔兑实测输沙量减沙比在 90%以上,说明孔兑综合治理造成的下垫面变化对产沙有巨大影响。

(3) 孔兑输沙量锐减的主导因素是人类活动的影响,从淤地坝的控制面积、产沙对植被覆盖度变化的敏感性说明,孔兑植被变化的减沙作用远大于淤地坝的拦沙量。但分析过程中对雨强的概念考虑不够,需进一步研究场次暴雨对产沙能力变化的作用。

参考文献:

- [1] 林秀芝,郭彦,侯素珍. 内蒙古十大孔兑输沙量估算方法探讨[J]. 泥沙研究,2014(2):16-21.
- [2] 刘晓燕,侯素珍,常温花. 黄河宁蒙河段主槽萎缩原因和对策[J]. 水利学报,2009,40(9):1048-1054.
- [3] 师长兴,范小黎,邵文伟,等. 黄河内蒙河段河床冲淤演变特征及原因[J]. 地理研究,2013,32(5):787-796.
- [4] Ran L, Wang S, Fan X. Channel change at Toudaoguai Station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. Journal of

- Geographical Sciences, 2010, 20(2): 231-247.
- [5] Hou S, Wang P, Guo Y, et al. Factors driving riverbed scouring and sedimentation in the Bayangaole to Toudaoguai reaches of the Upper Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9): 1305-1320.
- [6] 王平, 侯素珍, 张原锋, 等. 黄河上游孔兑高含沙洪水特点与冲淤特性[J]. 泥沙研究, 2013, (1): 67-73.
- [7] 刘韬, 张士峰, 刘苏峡. 十大孔兑暴雨洪水产输沙关系初探: 以西柳沟为例[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 18-21.
- [8] 李璇. 西柳沟流域水沙流失特点及治理措施探讨[J]. 内蒙古水利, 2013(1): 89-90.
- [9] 刘通, 黄河清, 邵明安, 等. 气候变化与人类活动对鄂尔多斯地区西柳沟流域入黄水沙过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 17-22.
- [10] 冉大川, 张栋, 焦鹏, 等. 西柳沟流域近期水沙变化归因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(5): 143-149.
- [11] 赵昕, 汪岗, 韩学士. 内蒙古十大孔兑水土流失危害及治理对策[J]. 中国水土保持, 2001(3): 4-6.
- [12] 曾茂林, 朱小勇, 康玲玲, 等. 水土流失区淤地坝的拦泥减蚀作用及发展前景[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 127-133.
- [13] 刘晓林, 杨胜天, 周旭, 等. 1980 年以来黄河内蒙古段十大孔兑流域土地利用变化时空特征[J]. 南水北调与水利科技, 2016(1): 30-36.
- [14] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾河流域水沙变化水文分析[J]. 人民黄河, 2001, 23(2): 9-11.
- [15] 王万忠. 黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J]. 水土保持通报, 1983, 3(4): 7-13.
- [16] Liu Xiaoyan, Yang Shengtian, Dang Suzhen, et al. Response of sediment yield to vegetation restoration at a largespatial scale in the Loess Plateau[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(8): 1482-1489.
- [17] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕. 黄土高原次降雨径流产沙变化及其与雨强和植被盖度变化的相关性, 干旱区研究, 2015, 32(4): 698-709.
- [18] 刘晓燕, 刘斌, 杨胜天. 黄土高原沟壑区产沙驱动力及减沙潜力分析[J]. 人民黄河, 2014, 36(5): 1-3.
- [19] 刘晓燕, 杨胜天, 王富贵, 等. 黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J]. 水利学报, 2014, 45(11): 1239-1300.
- [20] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 黄河潼关以上现状淤地坝拦沙作用研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(7): 37-99.
- [21] 赵广举, 穆兴民, 温仲明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8.

~~~~~

(上接第 61 页)

- [10] Taylor G H, Daly C. Using PRISM climate grids and GIS for extreme precipitation mapping[C]// Proceedings of the 14th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Seattle, WA, USA, 2004.
- [11] 朱华忠, 罗天祥, Daly C. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证[J]. 地理研究, 2003, 22(3): 351-359.
- [12] 赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 205-211.
- [13] 韩庆红, 陈渭民, 王普才, 等. PRISM 在松花江流域降水分布中的应用研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(1): 56-61.
- [14] 夏智武, 刘鹏举, 陈增威, 等. 山地环境日气温 PRISM 空间插值研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 83-90.
- [15] 蒋育昊, 刘鹏举, 夏智武, 等. 基于 PRISM 的山地环境大气湿度的空间插值[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2016, 45(6): 692-699.
- [16] Daly C. Variable influence of terrain on precipitation patterns: Delineation and use of effective terrain height in PRISM[R]. World Wide Web document. <http://www.ocs.orst.edu/prism/effter.pdf>, 2002.
- [17] 徐成东. 基于线性加权回归模型的降水量空间插值方法研究[D]. 河南开封: 河南大学, 2008.

~~~~~

(上接第 65 页)

- [14] 侯红波. 浏阳大围山土壤研究初探[J]. 湖南林业科技, 2004, 31(3): 27-28.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理性质测定[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [17] 卢喜平, 史东梅, 蒋光毅, 等. 两种果草模式根系提高土壤抗蚀性的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 64-67.
- [18] 谢红霞, 陈琼, 李锦龙, 等. 长沙市东郊不同母质发育耕型红壤的可蚀性因子 K 值估算[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 133-135.
- [19] 张振国, 黄建成, 焦菊英, 等. 安塞黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1): 28-31.