

延河流域骨干坝拦沙量反推与未来可拦沙年限预测

呼媛, 鲁克新, 李鹏, 李占斌, 杨媛媛, 马勇勇

(西安理工大学旱区生态水文与侵蚀灾害防治国家林业局重点实验室, 西安 710048)

摘要: 定量研究延河流域淤地坝拦沙贡献率和未来可拦沙潜力, 对流域淤地坝建设效益分析具有重要的参考价值。根据延河流域 1952—2018 年的径流输沙数据和 2011 年全国水利普查中的骨干坝建坝年限、控制面积、总库容和淤积库容等资料, 构建了延河流域骨干坝拦沙量反推计算模型, 计算了延河流域骨干坝逐年拦沙量与减沙贡献率, 预测了骨干坝未来可拦沙年限。结果表明: 不同年代延河流域骨干坝年均拦沙量持续增加, 2000—2011 年多年平均拦沙量为 401 万 t/a, 达到最大值; 人类活动是延河流域年输沙量减少的主要因素, 1997—2005 年和 2006—2011 年人类活动对延河流域减沙量的贡献率分别为 63.44% 和 84.98%; 骨干坝拦沙量在人类活动减沙量中的占比呈减小趋势, 1997—2005 年占比 24.67%, 2006—2011 年占比 7.46%; 截止 2019 年, 延河流域 62% 的骨干坝未来拦沙年限为 30 年以内, 并且北部骨干坝未来可拦沙能力大于南部骨干坝。研究结果可为延河流域水土流失防治与效益评价、水土保持措施规划与布局以及流域综合管理等提供参考依据。

关键词: 延河; 骨干坝; 拦沙量反推; 减沙贡献率; 可拦沙年限; 预测

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0038-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.03.006

Sediment Retention Calculation and Future Functional Life Prediction of the Key Check Dams in the Yanhe River Basin

HU Yuan, LU Kexin, LI Peng, LI Zhanbin, YANG Yuanyuan, MA Yongyong

(Key Laboratory of National Forestry Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Regions, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: The quantitative research on the contribution rate and the future deposit potential of check dams in the Yanhe River Basin has important reference value for evaluating the construction benefits of check dams. Based on the runoff and sediment transport data of the Yanhe River Basin from 1952 to 2018 and the data of the construction period, control area, total storage capacity, and the sedimentation storage of the key check dams in the 2011 National Water Conservancy Census, the inverse calculation model for the sediment retention capacity of the key check dam was established. The annual sediment retention and sediment reduction contribution rate of the key check dams in the Yanhe River Basin were calculated, and the future sediment retention years of the key check dams was predicted. The results showed that the annual average sediment interception of the key check dams in the Yanhe River Basin continued to increase in different periods, and the average annual sediment interception from 2000 to 2011 was 4.01 million ton per year, which was the maximum value among the different periods. The human activity was the main factor for the decreased annual sediment transport in the Yanhe River Basin, and the contribution rates of the human activity to the sediment reduction in the Yanhe River Basin from 1997 to 2005 and 2006 to 2011 were 63.44% and 84.98%, respectively. The proportion of sediment reduction caused by the key check dams accounting for that caused by the human activities was decreased, from 24.67% of 1997—2005 to 7.46% of 2006—2011. By the end of 2019, the future sediment-retaining period of 62% of the key check dams in the Yanhe River Basin was less than 30 years. Compared with those in the southern region, the key check dams in the northern Yanhe River Basin has the stronger future sand-retaining ability. The results in this study could provide reference for soil erosion

收稿日期: 2020-12-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404)

第一作者: 呼媛(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持生态修复与环境保护研究。E-mail: 304603921@qq.com

通信作者: 鲁克新(1974—), 男, 副教授, 主要从事水土资源与环境研究。E-mail: lkx2942@163.com

control and benefit evaluation, soil and water conservation measures planning and layout, and comprehensive management of the Yanhe River Basin.

Keywords: Yanhe River; key check dams; sediment retention inversion; contribution rate of sediment reduction; the years of sediment retention; prediction

我国是世界上水土流失最严重的国家之一,水土流失区分布范围广、面积大。黄河流域是我国水土流失重灾区,以水少沙多、水沙异源而著称^[1-2]。黄河近90%的泥沙来自于黄土高原地区^[2-3]。黄土高原地区是中国生态建设治理的重点区域,自20世纪50年代以来,国家在该地区实施了包括退耕还林还草和修建梯田、淤地坝等一系列水土流失治理措施^[3]。在气候变化和人类活动共同影响下,近几十年来黄河年输沙量呈显著减少趋势^[4-5]。潼关水文站实测多年平均输沙量由1919—1959年的15.92亿t减少到2000—2012年的2.76亿t,减幅达82.7%^[6]。

黄河水沙问题一直是我国学者研究的热点问题^[7]。大量研究^[8-14]表明,黄土高原水土流失综合治理是黄河水沙减少的主要原因。目前研究学者主要采用水文模型法、BP神经网络模型、双累积曲线法、弹性系数法等方法研究了人类活动和气候变化对流域水沙变化的影响,对水沙变化的归因分析大多停留在简单地区分气候变化和人类活动的贡献率,如赵阳等^[15]采用水文模型法对地处北京密云水库集水区的半城子小流域的径流变化进行了归因分析;任宗萍等^[16]基于Choudhury-Yang公式和流域水热耦合平衡方程,利用弹性系数法对无定河流域的径流变化进行了归因分析。但有关淤地坝、梯田、林草植被三大水土保持措施减水减沙贡献率的研究相对较少,如何定量计算上述三大水土保持措施各自的减水减沙贡献率是目前研究的热点和难点。冉大川等^[17]的研究成果表明,20世纪90年代以来淤地坝的减沙效益最大,达到30.2%;刘晓燕等^[18]通过分析2010—2013年林草植被覆盖率及其较天然时期的变化,提出了林草与梯田叠加作用地区的减沙量计算方法;高海东等^[19]根据水沙、植被以及淤地坝数据构建了河龙区间淤地坝拦沙模型。总的来说,为了更加有效地识别三大水土保持措施各自减沙贡献率,目前仍需开展深入、系统的研究工作。

本研究以黄河一级支流延河流域为研究区,以三大水土保持措施之一的淤地坝工程为重点研究对象,探究淤地坝对延河流域减沙贡献率。由于目前较全面的淤地坝数据仅有2011年第一次全国水利普查数据,要定量分析各阶段淤地坝建设对流域减沙的贡献率需计算各阶段淤地坝的拦沙量。本研究利用水文资料,按照“大水对大沙”的原则构建延河流域骨干坝拦沙量反推模型,对延河流域骨干坝拦沙量进行反

推,进而定量计算不同阶段骨干坝拦沙对延河流域减沙的贡献率,预测延河流域现存骨干坝未来的可拦沙能力及可拦沙年限,以期对延河流域水土流失防治与效益评价、水土保持措施规划与布局以及流域综合管理等提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

延河流域位于108°45′—110°28′E, 36°23′—37°17′N,属黄河中游河口镇—龙门区间的一级支流,流域总面积7 687 km²,其中90%属于黄土高原丘陵沟壑区,平均海拔958 m,坡度0~60°(图1)。研究区为甘谷驿水文站控制断面以上的延河流域,面积5 891 km²,占流域总面积的76.3%。研究区多年平均降水量520 mm,由西北到东南逐渐减少,7—9月降水量占全年降水量的70%以上;年均气温为8.8~10.2℃,由西北向东南递增;年径流深地区分布差异较大,由西北到东南逐渐减少。土壤类型包括黄绵土、冲积土、黏土、黑垆土等,分布最广的是黄绵土。植被分布包括森林、森林草原和草原。

延河流域是黄河中游水土流失最严重的支流之一,多年平均输沙模数为6 619.4 t/(km²·a)。自20世纪50年代以来,延河流域开展了小流域治理、淤地坝工程、退耕还林还草等一系列水土保持措施。1996年以来,延河流域甘谷驿水文站的年径流量和年输沙量呈现出显著减少的趋势,多年平均径流量由1996年前的22 038万m³减少到1997—2018年的15 135 m³,多年平均输沙量由1996年前的4 898万t减少到1997—2018年的1 222万t,减幅分别为31%与75%。

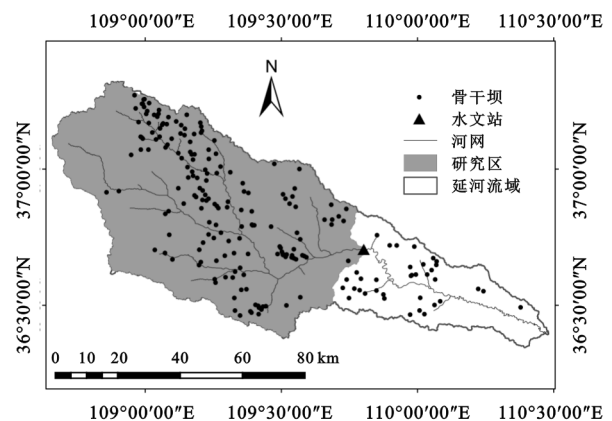


图1 研究区及已建骨干坝坝址位置

截止2011年年底,延河流域共有骨干坝210座,总库容约2.6亿m³,已淤总库容13 715万m³,拦沙

总量 18 104 万 t。不同时段延河流域骨干坝的建设历程见表 1。统计结果表明,延河流域 2000 年以后达到建坝高峰期,2000—2011 年建设骨干坝 85 座,占现有骨干坝数量总量的 40%。

表 1 不同年代延河流域骨干坝建坝数量及特征值

年代	建坝 数量/座	控制 面积/km ²	总库容/ 万 m ³	淤积库容/ 万 m ³
1950—1959	12	229	2493	135
1960—1969	15	206	2178	736
1970—1979	52	695	6397	1612
1980—1989	20	124	2407	2186
1990—1999	26	180	3483	3114
2000—2011	85	461	9025	5932
总计	210	1895	25983	13715

1.2 数据来源与处理

1.2.1 水沙数据 本研究采用延河流域甘谷驿水文站 1952—2018 年历年实测径流泥沙资料,资料来源为《中华人民共和国水文年鉴》^[20]与《中国河流泥沙公报》^[21],同时收集了延河流域 1954—2015 年 31 个雨量站的逐日降雨量数据。根据谢云等^[22]的研究结果,黄河流域坡面侵蚀的侵蚀性日降雨量标准为 12 mm。故本研究采用 12 mm 日降雨量作为临界侵蚀性降雨量指标,利用泰森多边形法计算出研究区日面平均降雨量,统计各大于 12 mm 的日降雨量 P_{12} ,汇总计算得到研究区年侵蚀性降雨量。

1.2.2 淤地坝数据 延河流域研究区域的骨干坝数据来源于 2011 年第一次全国水利普查。普查数据包括截止 2011 年年底的每座骨干坝的坝名、修建年份、地理位置、控制面积、总库容及已淤库容等,数据资料精度高,是目前研究骨干坝减沙效益的主要数据源。

1.3 研究方法

1.3.1 骨干坝拦沙量反推 依据“大水对大沙”原则,假定水文站历年年径流量占累积年径流量的比值与历年年输沙量占累积年输沙量的比值相等,进而淤地坝历年泥沙淤积量占累积年淤积量的比值近似可以用水文测站历年年径流量占累积年径流量的比值代替。在此假定下,用于骨干坝拦沙量反推的计算方法为:

(1)根据研究淤地坝所在流域水文测站的实测历年年输沙量系列资料,首先利用 Pettitt 检验法推求年输沙量系列的突变年份;其次利用相关分析法分别建立第 1 个突变年份前、第 1 个突变年份后至第 2 个突变年份前、第 2 次突变年份后 3 个不同研究时段内的年输沙量(y)与年径流量(x)之间的线性相关关系,得到对应 3 个研究时段的相关系数 $k_1, k_2, k_3, k_3 < k_2 < k_1$ 。

(2)假定 2 个突变年份将淤地坝所在流域水文站历年年径流量划分为 3 个时段,为了描述方便,将第 1 个突变年份前、第 1 个突变年份后至第 2 个突变年

份前、第 2 个突变年份后 3 个不同研究时段的年径流量分别用 W_i, W_j, W_l 表示,2011 年某研究淤地坝的泥沙淤积总量为 $S_{总}$ 。

(3)突变年份前、后该研究淤地坝的历年年淤积量计算公式为:

$$S_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^m W_i + \frac{k_2}{k_1} \sum_{j=1}^n W_j + \frac{k_3}{k_1} \sum_{l=1}^o W_l} \times S_{总} \tag{1}$$

$$S_j = \frac{\frac{k_2}{k_1} \cdot W_j}{\sum_{i=1}^m W_i + \frac{k_2}{k_1} \sum_{j=1}^n W_j + \frac{k_3}{k_1} \sum_{l=1}^o W_l} \times S_{总} \tag{2}$$

$$S_l = \frac{\frac{k_3}{k_1} \cdot W_l}{\sum_{i=1}^m W_i + \frac{k_2}{k_1} \sum_{j=1}^n W_j + \frac{k_3}{k_1} \sum_{l=1}^o W_l} \times S_{总} \tag{3}$$

式中: $S_{总}$ 为 2011 年研究淤地坝的实测泥沙淤积总量(万 t); S_i, W_i 分别为突变年份前的淤地坝历年年淤积量计算值和淤地坝所在流域水文站对应年份的年径流量实测值(万 m³),其中 i 为从淤地坝建坝年份到第 1 个突变年份的年份序号; S_j, W_j 为第 1 个突变年份后的淤地坝历年年淤积量计算值和淤地坝所在流域水文站对应年份的年径流量实测值(万 m³),其中 j 为从第 1 个突变年份到第 2 个突变年份的年份序号; S_l, W_l 为第 2 个突变年份后的淤地坝历年年淤积量计算值和淤地坝所在流域水文站对应年份的年径流量实测值(万 m³),其中 l 为从第 2 个突变年份到 2011 年的年份序号。

1.3.2 延河流域骨干坝拦沙对输沙量减少的贡献率

采用 Mann-Kendall 趋势检验法分别对延河流域年侵蚀性降雨量、年径流量及年输沙量系列资料进行趋势检验。通过 Pettitt 检验法确定延河流域年径流量和年输沙量的突变年份。采用年侵蚀性降雨量—年输沙量双累积曲线,划分降雨因素和人类活动因素对研究流域年输沙量减少的贡献率。结合骨干坝年拦沙量反推结果,计算各阶段骨干坝年拦沙量占研究区域人类活动减沙量的贡献率。

1.3.3 延河流域骨干坝未来可拦沙年限预测 根据建坝年限与已淤库容,计算延河流域骨干坝 2000—2011 年期间的多年平均拦沙模数,再结合各骨干坝剩余库容,计算流域现有骨干坝的未来可淤积年限,计算公式为:

$$W_{S2000} = \frac{V}{Y \times A} \tag{4}$$

$$Y_R = \frac{V_R}{A \times \overline{W}_{S2000}} \tag{5}$$

式中: W_{S2000} 为流域 2000 年以后修建的淤地坝的拦沙模

数($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$); V 为 2000 年以后修建的淤地坝的已淤库容(万 t); Y 为淤地坝已淤年限(a); A 为 2000 年以后修建的淤地坝坝控面积(km^2); Y_R 为剩余可拦沙年限(a); V_R 为剩余拦泥库容(万 t); $\overline{W}_{S2000}$ 为 2000 年以后修建的淤地坝的多年平均拦沙模数($\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$)。

2 结果与分析

2.1 延河流域水沙变化特征

由图 2 和表 2 可知,1952—2018 年延河流域年侵蚀性降雨量无显著变化趋势,而年径流量与年输沙量均呈现显著减少趋势($P<0.01$)。根据表 3 可知,延河流域年输沙量一级突变年份为 1996 年($P<0.05$),二级突变年份为 2005 年($P<0.05$)。年径流量的突变年份为 1996 年($P<0.05$)。

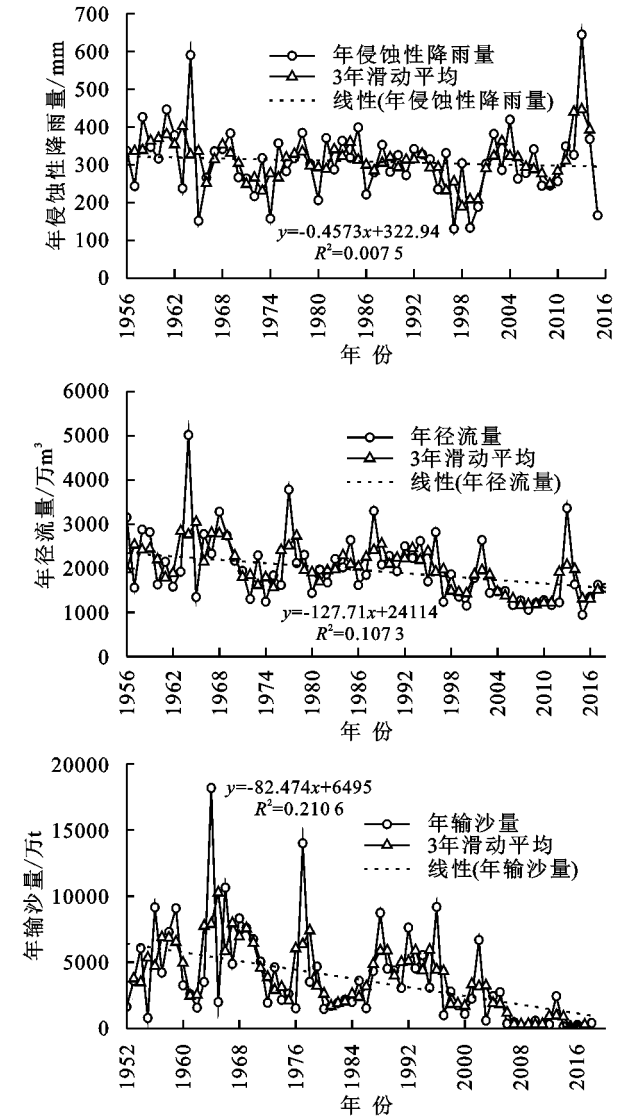


图2 研究流域年侵蚀性降雨量、年径流量及年输沙量年际变化趋势

2.2 骨干坝逐年拦沙量反推

Pettitt 检验法计算结果表明,1952—2018 年延河流域年输沙量突变年份为 1996 年和 2005 年,以突变年份为节点将 1952—2018 年分为 3 个不同研究时

段,对各个时段的年侵蚀性降雨量和年输沙量进行线性拟合,得到线性相关系数 $k_1=0.436\ 6$, $k_2=0.370\ 6$, $k_3=0.093\ 9$,详见图 3。

表2 研究流域年侵蚀性降雨量、年径流量和年输沙量年际变化趋势 M-K 检验结果

研究对象	年侵蚀性降雨量	年径流量	年输沙量
Zkm	-0.95	-3.60	-4.24
显著性	—	<0.01	<0.01

表3 1952—2018 年研究流域年径流量和年输沙量突变年份 Pettitt 检验结果

研究对象	年径流量	年输沙量
突变年份	1996 年	1996 年 2005 年
显著性	<0.05	<0.05 <0.05

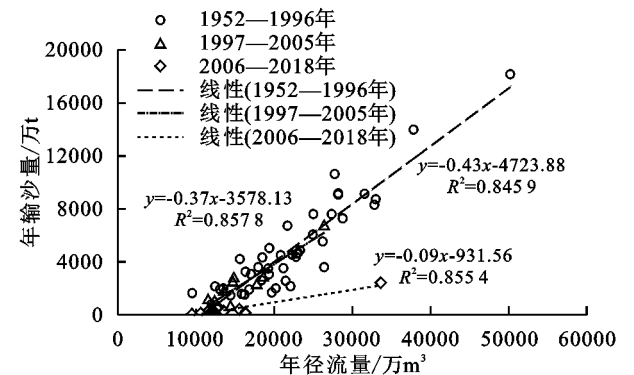


图3 突变年份前、后研究流域年径流量与年输沙量关系

结合 1.3.1 节的计算模型,反推得到的延河流域骨干坝逐年拦沙量。由表 4 可知,延河流域自 1954 年开始建设淤地坝以来,逐年代年均拦沙量持续增加,2000—2011 年骨干坝多年平均拦沙量为 401 万 t ,达到最大值。1970—1979 年延河流域骨干坝多年平均拦沙量增幅最大,比 1960—1969 年多年平均拦沙量增加了 98 万 t ,之后多年平均拦沙量增幅开始下降,2000—2011 年延河流域骨干坝多年平均拦沙量增幅最小,比 1990—1999 年多年平均拦沙量仅增加了 63 万 t 。

表4 不同年代延河流域骨干坝拦沙量分析

单位:万 t

年代	累积拦沙量	不同年代 拦沙量	多年平均 拦沙量	不同年代多年平均 拦沙量增加量
1954—1959	127	127	21	—
1960—1969	997	870	87	66
1970—1979	2848	1851	185	98
1980—1989	5424	2576	258	73
1990—1999	8802	3378	338	80
2000—2011	13611	4809	401	63

由图 4 可知,1954—2011 年延河流域骨干坝年拦沙总量整体呈波动上升趋势,2005 年拦沙总量达

到最大值,为 771 万 t,2006 年之后研究流域骨干坝年均拦沙量稳定在 303 万 t 左右。统计分析结果表明,甘谷驿水文站控制断面以上流域多年平均侵蚀性降雨量为 309 mm,多年平均径流量为 19 771 万 m³,多年平均输沙量为 3 691 万 t。2005 年研究流域年侵蚀性降雨量为 263 mm,年径流量 14 850 万 m³,年输沙量 2 740 万 t,三者均低于多年平均值,而 2005 年新建骨干坝 14 座,淤地坝数量增多是导致年拦沙量增大的主要原因。2005 年之后研究流域水沙关系突变,同等数量年径流量对应的年输沙量显著减少,导致淤地坝年拦沙量略微下降。

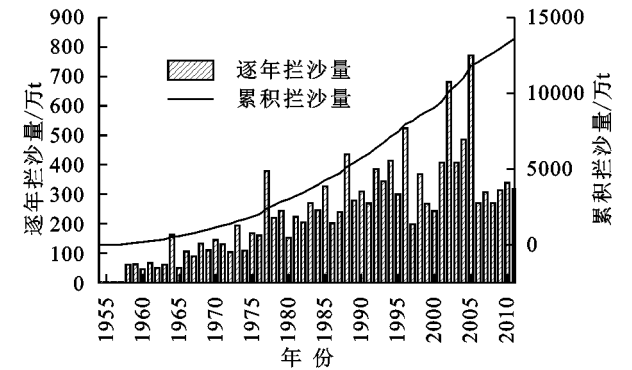


图 4 研究流域骨干坝年拦沙量年际变化曲线

2.3 骨干坝拦沙对延河流域年输沙量减少的贡献

在绘制年侵蚀性降雨量—年输沙量双累积曲线时,若研究流域的下垫面条件相对不变,则年侵蚀性降雨量和年输沙量之间的双累积曲线应该为一条直线;相反,若人类活动导致研究流域下垫面条件发生改变,则年侵蚀性降雨量和年输沙量之间的双累积曲线会发生转折。从图 5 可以看出,双累积曲线有 2 个明显拐点,这与 Pettitt 检验法分析得到研究流域年输沙量存在 1996 年、2005 年 2 个突变年份的结果是一致的。

将 1954—2011 年分为 P1(1954—1996 年)、P2(1997—2005 年)、P3(2006—2011 年)3 个研究时段,以第 1 次发生突变的 1996 年前的 P1 时段作为基准期,得到 1954—1996 年的年侵蚀性降雨量—年输沙量双累积曲线的回归方程(图 5),进而计算 P2、P3 时

段年侵蚀性降雨量与人类活动对研究流域年输沙量的影响量,结果见表 5。

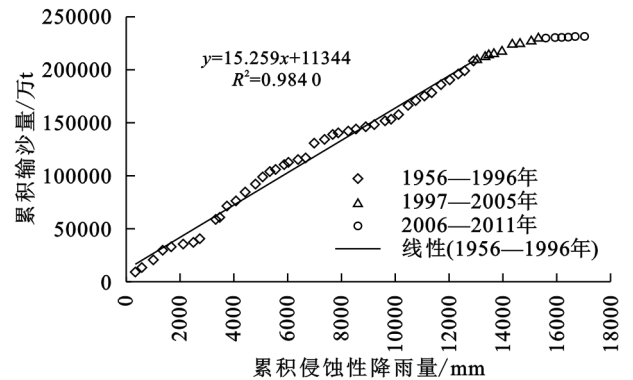


图 5 延河流域年侵蚀性降雨量和年输沙量双累积曲线

由表 5 可知,P2 阶段(1997—2005 年)研究流域年均输沙量比基准期减少了 2 717 万 t,占基准期多年平均输沙量的 53.47%,其中降雨减沙量 993.33 万 t,人类活动减沙量 1 723.67 万 t,分别占总减沙量的 36.56%与 63.44%;P3 阶段(2006—2011 年)年均输沙量比基准期减少了 4 771.95 万 t,占基准期多年平均输沙量的 93.92%,其中降雨减沙量 716.89 万 t,人类活动减沙量 4 055.07 万 t,分别占总减沙量的 15.02%和 84.98%。骨干坝多年平均拦沙量由 P2 阶段的 425.24 万 t 减少到 P3 阶段的 302.60 万 t,占人类活动减沙量的比例由 24.67%减少至 7.46%。

20 世纪 50 年代以来,延河流域开展了大规模的水土保持工作。1994—2002 年实施的世行贷款黄土高原水土保持延河项目、1997 年开始实施的山川秀美工程及 1999 年开始实施的退耕还林草工程使延河流域的水土保持工作取得了显著成效,人类活动减沙量占基准期实测输沙量的 63.44%~84.98%。由于林草植被与梯田的减沙效益逐渐变大,流域下垫面条件发生改变,泥沙输移量减少,导致淤地坝可拦沙量减少,以及已淤满的淤地坝基本不再发挥拦沙功效,所以延河流域骨干坝拦沙量占人类活动减沙量的比例由 24.67%减少至 7.46%。

表 5 侵蚀性降雨、人类活动及骨干坝对输沙量的影响

研究时段	年输沙量	年输沙量	实测年输沙量减少量		侵蚀性降雨减沙量		人类活动减沙量		骨干坝拦沙量	
	实测值/	计算值/	数量/	比例/	数量/	比例/	数量/	比例/	数量/	比例/
	(万 t·a ⁻¹)	(万 t·a ⁻¹)	(万 t·a ⁻¹)	%	(万 t·a ⁻¹)	%	(万 t·a ⁻¹)	%	(万 t·a ⁻¹)	%
1997 年前	5080.95	5080.23								
1997—2005	2363.96	4087.63	2717.00	53.47	993.33	36.56	1723.67	63.44	425.24	24.67
2006—2011	309.00	4364.07	4771.95	93.92	716.89	15.02	4055.07	84.98	302.60	7.46

2.4 延河流域骨干坝未来可拦沙年限预测

公式(4)~(5)计算结果表明,截止 2011 年,延河流域仍有拦沙能力的骨干坝总共 209 座,地理位置见图 6a。其中 61%的骨干坝未来预计还可以拦沙 10

年,26%的骨干坝未来预计还可以拦沙 30 年,9%的骨干坝未来预计还可以拦沙 50 年。未来 60 年后延河流域仅剩 3 座骨干坝仍有拦沙能力。

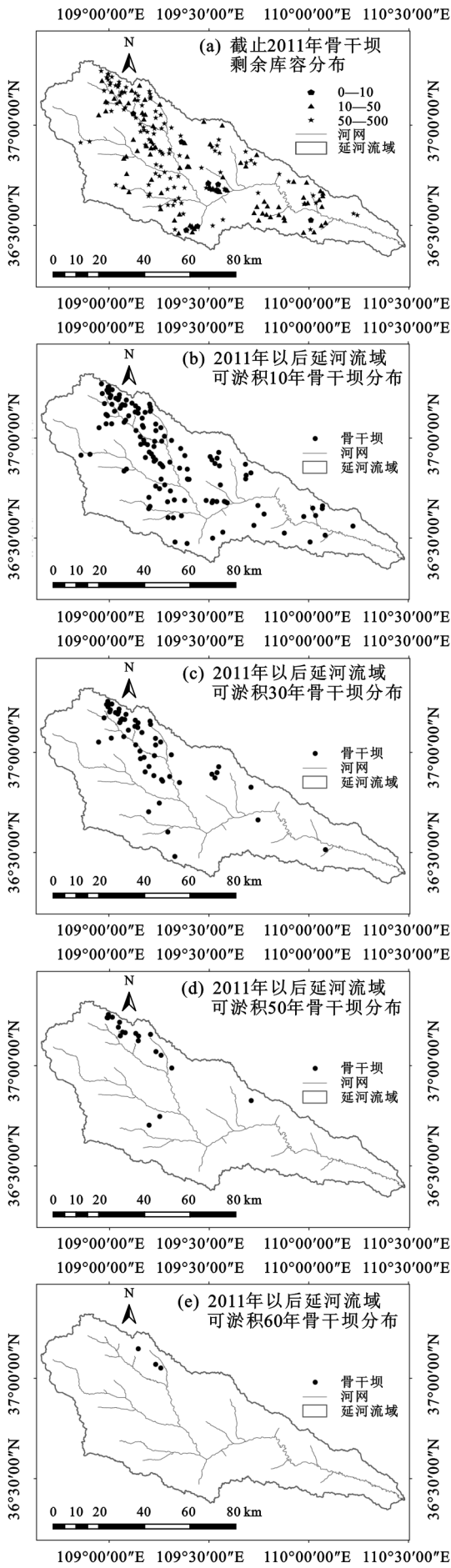


图6 延河流域不同阶段骨干坝分布

图6b~e分别为截止2011年研究流域仍可淤积10,30,50,60年的骨干坝空间位置分布。统计结果表明,安塞区冰草峪村九沟沟沟骨干坝未来还可拦沙83年,是延河流域骨干坝中未来可淤积年限最多的骨干坝。由图6b~e可知,位于延河流域北部的骨干坝的未来可拦沙能力大于位于延河南部的骨干坝。在延河流域未来淤地坝工程建设中,若地形地貌、植被等条件符合要求,可优先选择将新建淤地坝布设于南部地区。

3 讨论

3.1 骨干坝拦沙量反推结果的合理性分析

由表6可知,本研究结果小于魏艳红^[23]的研究结果而大于刘晓燕^[24]的研究结果。魏艳红^[23]的研究对象为延河流域所有的大中小型淤地坝,受资料限制,本研究的研究对象仅为延河流域的骨干坝,因此本研究结果偏小。刘晓燕^[24]认为,当骨干坝已淤库容达到总库容的77%时,骨干坝即失去拦沙能力。本研究认为,当骨干坝的已淤库容达到总库容的100%时,骨干坝才失去拦沙能力。因此,本研究结果偏大。综上所述,本研究结果是基本合理的。

表6 延河流域淤地坝年均拦沙量研究结果对比

研究时段	单位:万 t/a	
	以往结果	本研究结果
2000 年以前	483 ^[23]	217
2007—2011 年	175 ^[24]	369

3.2 骨干坝控制面积与拦沙量的关系

由图7可知,拟合得到的延河流域骨干坝逐年累积有效坝控面积与骨干坝累积拦沙量之间的线性回归方程的相关系数 $R^2=0.6264$,因此两者之间的线性相关性较高,且骨干坝累积拦沙量与坝控面积呈正相关关系。

通过 ArcGIS 软件水文模块对延河流域 DEM 进行处理,提取流域河网,并将淤地坝数据导入河网,使用 ArcSWAT 模块把淤地坝的坝址作为集水区的出口,绘制出每个淤地坝控制的集水区范围,详见图8。

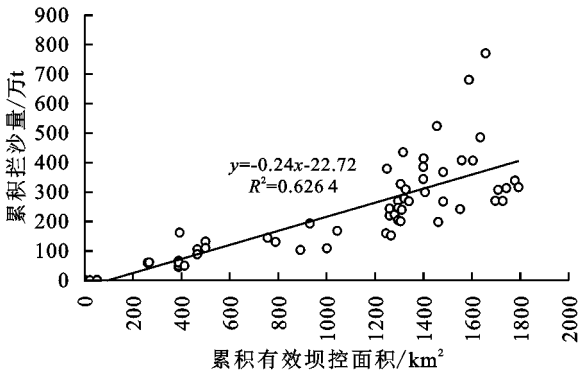


图7 延河流域骨干坝逐年累积有效坝控面积与骨干坝累积拦沙量关系

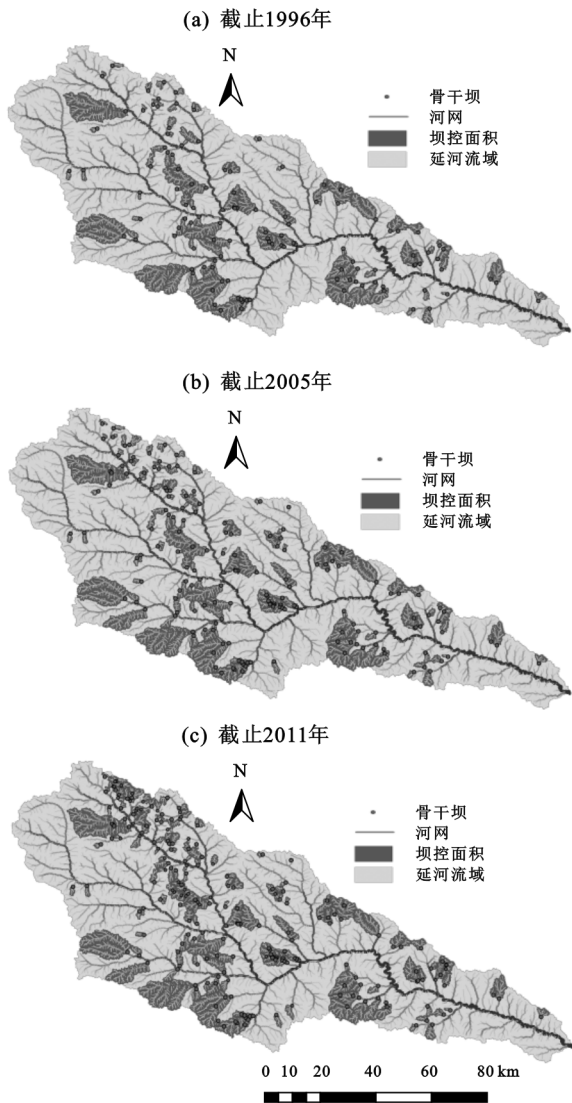


图 8 截止 1996 年、2005 年及 2011 年延河流域骨干坝控制范围

4 结论

(1)1952—2018 年延河流域年侵蚀性降雨量无显著变化趋势,年径流量与年输沙量均呈现显著减少趋势,年输沙量突变年份为 1996 年和 2005 年,年径流量突变年份为 1996 年。

(2)延河流域骨干坝逐年代年均拦沙量持续增加,2000—2011 年骨干坝多年平均拦沙量为 401 万 t,达到最大值。

(3)人类活动是延河流域输沙量减少的主要原因,1997—2005 年、2006—2011 年人类活动影响对流域输沙量的减沙量贡献率分别为 63.44%和 84.98%,呈增长趋势;骨干坝拦沙量占人类活动减沙总量的比例由 1997—2005 年的 24.67%减少到 2006—2011 年的 7.46%。

(4)截止 2011 年,延河流域仍有拦沙能力的骨干坝总共 209 座。其中 61%的骨干坝未来预计还可以拦沙 10 年,26%的骨干坝未来预计还可以拦沙 30

年,9%的骨干坝未来预计还可以拦沙 50 年。延河流域北部骨干坝的未来可拦沙能力大于南部骨干坝。

参考文献:

- [1] 史辅成,张冉.近期黄河水沙量锐减的原因分析及认识[J].人民黄河,2013,35(7):1-3.
- [2] 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.
- [3] Wang F, Mu X M, Li R, et al. Co-evolution of soil and water conservation policy and human-environment linkages in the Yellow River Watershed since 1949 [J].Science of the Total Environment,2015,508:166-177.
- [4] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J].Nature Geoscience,2016,9:38-41.
- [5] Miao C Y, Ni J R, Borthwick A G L. Recent changes of water discharge and sediment load in the Yellow River watershed,China [J].Progress in Physical Geography,2010,34(4):541-561.
- [6] 水利部黄河水利委员会.黄河水沙变化研究[R].郑州:水利部黄河水利委员会,2015:20-21.
- [7] 王光谦.江河治理与水沙关系—黄河流域产流产沙模拟与水沙变化[J].中国水利,2011(6):27.
- [8] Liang K, Liu C M, Liu X M, et al. Impacts of climate variability and human activity on streamflow decrease in a sediment concentrated region in the Middle Yellow River [J].Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2013,27(7):1741-1749.
- [9] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River basin,China [J].Hydrology and Earth System Sciences,2013,17(3):961-972.
- [10] Gao P, Mu X M, Wang F, et al. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River [J].Hydrology and Earth System Sciences,2011,15(1):1-10.
- [11] Peng G, Zhang X C, Mu X M, et al. Trend and change-point analyses of streamflow and sediment discharge in the Yellow River during 1950—2005 [J].International Association of Scientific Hydrology Bulletin,2010,55(2):275-285.
- [12] Gao Z L, Fu Y L, Li Y H, et al. Trends of streamflow, sediment load and their dynamic relation for the catchments in the middle reaches of the Yellow River over the past five decades [J].Hydrology and Earth System Sciences,2012,16:3219-3231.
- [13] Peng J, Chen S L, Dong P. Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin,China, and its impacts on the lower reaches and the river delta [J].Cate-

- na,2010,83:135-147.
- [14] Miao C, Ni J, Borthwick A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River [J].Global and Planetary Change,2011,76(3):196-205.
- [15] 赵阳,张晓明,曹文洪,等.北京水源地变化环境下的小流域径流响应研究[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):22-33.
- [16] 任宗萍,马勇勇,王友胜,等.无定河流域不同地貌区径流变化归因分析[J].生态学报,2019,39(12):4309-4318.
- [17] 冉大川,姚文艺,李占斌,等.不同库容配置比例淤地坝的减沙效应[J].农业工程学报,2013,29(12):154-162.
- [18] 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):1293-1300.
- [19] 高海东,刘晗,贾莲莲,等.2000—2017 年河龙区间输沙量锐减归因分析[J].地理学报,2019,74(9):1745-1757.
- [20] 中华人民共和国水利部水文局.中华人民共和国水文年鉴:黄河流域水文资料[M].郑州:黄河水利委员会,1952—2015.
- [21] 中华人民共和国水利部.中国河流泥沙公报[M].北京:中国水利水电出版社,2016—2018.
- [22] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [23] 魏艳红.延河与皇甫川流域典型淤地坝淤积特征及其对输沙变化的影响[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,2017.
- [24] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版社,2016:125-126.
- (上接第 37 页)
- [14] 林田,李军,李可昌,等.广东新丰江水库 XFJ-1 孔 DDTs 和 HCHs 的沉积记录[J].湖泊科学,2010,22(2):215-220.
- [15] 李平阳.广西北部湾沉积物高分辨率有机地球化学记录研究[D].南宁:广西大学,2014.
- [16] 张媚,孙玉川,谢正兰,等.岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析[J].环境科学,2016,37(9):3356-3364.
- [17] 裴曾莉,龙翼,张云奇,等.近 100 年喀斯特槽谷区洼地沉积速率与流域产沙强度[J].水土保持学报,2020,34(2):23-29.
- [18] 俱战省,严冬春,文安邦,等.塘库沉积的¹³⁷Cs 法断代测定三峡库区小流域产沙量[J].地球与环境,2018,46(1):76-81.
- [19] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J].Nature Geoence,2015,9:38-41.
- [20] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, et al. Quantifying the anthropogenic and climatic contributions to changes in water discharge and sediment load into the sea:A case study of the Yangtze River,China [J].Science of the Total Environment,2015,536:803-812.
- [21] Li Z W, Xu X L, Zhang Y H, et al. Reconstructing recent changes in sediment yields from a typical karst watershed in southwest China [J].Agriculture,Ecosystems and Environment,2019,269(1):62-70.
- [22] 盛美玲,方海燕,郭敏.东北黑土区小流域侵蚀产沙 WaTEM/SEDEM 模型模拟[J].资源科学,2015,37(4):815-822.
- [23] 王夏青,夏梦婷,许建伟,等.黄土高原北部丘陵沟壑区近 160 年土壤侵蚀量演变及其对 ENSO 事件的响应[J].地理科学,2019,39(7):1174-1183.
- [24] Zhao G G, 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.
- [25] 景可,焦菊英,李林育,等.中国南方红壤丘陵区土壤侵蚀量与泥沙输移比研究[J].水利学报,2010,41(12):1476-1482.