

大理河流域淤地坝拦沙贡献率分析

杨媛媛¹, 李占斌^{1,2}, 高海东¹, 刘蓓蕾¹, 朱大为³

(1.西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地,西安 710048;2.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;3.国网陕西省电力公司建设分公司,西安 710075)

摘要: 为提高淤地坝拦沙贡献率的计算精度,揭示淤地坝拦沙量对流域输沙量减少的作用。以大理河流域为研究对象,提出一种基于 GIS 和土壤侵蚀模数的淤地坝逐年拦沙量计算方法,分析大理河流域淤地坝拦沙量对流域出口输沙量减少的贡献率。结果表明:(1)1954—2011 年,大理河流域淤地坝逐年拦沙量呈波动式增加,多年平均拦沙量为 0.12 亿 t,累积拦沙量为 7.17 亿 t,其中 1980—1989 年年均拦沙量最高,为 0.19 亿 t。(2)1960—2015 年,大理河流域输沙量呈显著减少趋势,且在 1971 年和 2002 年均发生显著突变 ($P < 0.05$)。(3)人类活动是大理河流域输沙量减少的主要原因,1971—2001 年淤地坝拦沙量占人类活动减少输沙量的贡献率为 47.42%;随着流域植被恢复,2002—2011 年淤地坝拦沙量占人类活动减少输沙量的贡献率降至 31.04%。该方法对评价大理河流域淤地坝拦沙贡献率有一定的指导意义。2000 年以后,由于植被恢复,大理河流域淤地坝拦沙贡献率下降。

关键词: 大理河; 人类活动; 输沙量; 淤地坝; 拦沙贡献率

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)01-0085-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.01.012

Analysis on the Contribution Rate of Sediment Reduction of Check Dams in Dali River Basin

YANG Yuanyuan¹, LI Zhanbin^{1,2}, GAO Haidong¹, LIU Beilei¹, ZHU Dawei³

(1.State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic in Northwest Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.State Grid Shaanxi Electric Power Company Construction Branch, Xi'an 710075)

Abstract: In order to improve the calculation accuracy of the contribution rate of check dams and reveal the effect of check dams on the reduction of sediment discharge in watershed. Taking Dali river basin as the research object, we developed a method based on integrated GIS and soil erosion model to calculate the annual sediment deposition of check dams. The results showed that: (1) From 1954 to 2011, the sediment reduction in check dams increased in a fluctuant way year by year, and the average and cumulative capacity were 0.12×10^8 t and 7.17×10^8 t respectively. In the period of 1980—1989, the average sediment reduction in check dams reached up to 0.19×10^8 t. (2) The sediment discharge of Dali river were significantly reduced in 1960—2015, and had significant mutations in both 1971 and 2002 ($P < 0.05$). (3) Human activity was the main reason for sediment reducing in Dali river watershed, the contribution of sediment reduction in check dams were 47.42% in 1971—2001, while declined to 31.04% in 2002—2011 with the restoration of vegetation in Dali river watershed. The method we proposed was helpful for evaluating the contribution rate of sediment reduction of check dams in Dali river basin. After 2000, the contribution rate decreased in Dali river basin due to vegetation restoration in this area.

Keywords: Dali river basin; human activities; sediment load; check dams; contribution rate of sediment reduction

收稿日期: 2020-06-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41877077); 国家重点研发计划项目(2016YFC0402404)

第一作者: 杨媛媛(1990—), 女, 博士研究生, 主要从事生态水文与流域泥沙研究。E-mail: ezcbrpvuva@163.com

通信作者: 李占斌(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhanbinli@126.com

黄土高原 66 万多条沟道是侵蚀产沙的主要来源区,每年向黄河输送大量泥沙。淤地坝是黄土高原水土流失防治的重要水土保持工程措施。研究者从淤地坝的减沙效益和淤积机理等方面做了大量工作。其中,焦菊英等^[1]研究表明,皇甫川等 5 条流域内的淤地坝拦沙效益为 23.3%~52.9%。Pal 等^[2]研究发现,淤地坝对流域输沙率有显著的改变。而在淤地坝的减沙效益计算方法方面,王宏等^[3]采用“成因法”计算了河龙区间南片淤地坝的减沙贡献率;许炯心^[4]运用大量实测资料对无定河淤地坝及其拦沙效应进行了研究,并用水文法对其水土保持措施的减沙效益进行了估算;杨启红^[5]则使用 SWAT 模型对黄土高原不同水土保持措施情景进行模拟发现,淤地坝拦减泥沙最多。但鲜有学者对淤地坝逐年的拦沙量进行计算,因黄土高原淤地坝数量众多,难以每年对其拦沙量进行调查,所以多数的淤地坝拦沙量都是累积到调查年份的淤积量。2011 年第一次全国水利普查实测的骨干坝拦沙量为自建坝年开始至 2011 年总的淤积量,在黄河水沙变化具有时段特征的情况下,分析淤地坝逐年的拦沙量特征尤为重要。因此,本研究构建了一种基于 GIS 和土壤侵蚀模数的淤地坝逐年拦沙量计算方法,旨在提高淤地坝拦沙贡献率的计算精度,为科学认识黄河输沙量变化原因提供参考。

1 研究区概况

大理河流域是黄河中游河口镇至龙门区间淤地坝工程最多的黄河二级支流,是无定河的最大支流(图 1),干流全长 170 km,面积 3 906 km²,属黄土丘陵沟壑区第 1 副区,主要土壤类型为黄绵土,其流域出口控制站为绥德水文站,控制面积为 3 893 km²,1954—2015 年平均侵蚀性降雨为 258 mm,1960—2015 年年均径流量和输沙量分别为 1.34 亿 m³和 3 086.54 万 t。1970 年以来,流域径流和输沙量已大幅度减小。根据 2008 年淤地坝安全大检查和 2011 年第一次全国水利普查,1954—2011 年大理河流域共建设骨干坝、中型坝和小型坝分别为 278,1 236,2 089 座。

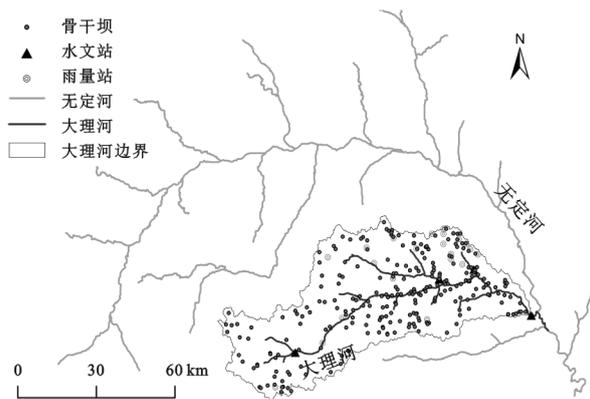


图 1 研究区位置及雨量站、水文站、骨干坝分布

2 材料与方法

2.1 降水量和径流泥沙

降水量和径流泥沙数据来自《中华人民共和国水文年鉴》^[6]、黄河流域水文资料,笔者收集了大理河流域 26 个气象站点 1954—2015 年的逐日降水数据。采用 12 mm 日降雨量作为临界侵蚀降雨量指标^[7],汇总得到年侵蚀性降雨。径流泥沙数据时间序列为 1960—2015 年。采用 Mann-Kendall 检验法^[8]和 Pettitt 判别法^[9]对大理河流域年输沙量进行趋势检验和突变检验。

2.2 归一化植被指数(NDVI)

采用美国国家航天航空局推出的 GIMMS (Global Inventory Modelling and Mapping Studies) NDVI 数据,该数据集包括了 1982—2015 年间的全球植被指数变化,时间分辨率为 15 天,空间分辨率为 8 km。已有研究^[10]表明,1950—1981 年黄河中游地区植被变化平稳,因此 1954—1981 年的 NDVI 值采用 1982—1985 年的平均值代替。植被覆盖度(V)计算方法为:

$$V = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}) \quad (1)$$

式中:NDVI_{max}和 NDVI_{min}分别为大理河流域内最大和最小 NDVI 值。NDVI_{max}在 NDVI 累积概率 95% 确定,NDVI_{min}在 5% 处确定。

植被覆盖—管理因子(C)计算方法^[11]为:

$$C_1 = e^{-0.0418(V-5)}, V > 5\% \\ C_2 = 1, V \leq 5\% \quad (2)$$

2.3 梯田

梯田数据来源于黄河上中游管理局。水土保持工程措施因子(P)计算方法^[12]为:

$$P = (1 - \frac{A_t}{A})^\alpha \quad (3)$$

式中:A_t和 A 分别为梯田面积、流域土地面积(km²);α 为梯田减沙效益,取 0.12^[13]。

2.4 淤地坝

淤地坝数据源自 2008 年淤地坝安全大检查(骨干坝、中型坝和小型坝)和 2011 年第一次全国水利普查(骨干坝)数据。结合 2008 年淤地坝安全大检查数据和淤地坝除险加固数据中每座骨干坝的位置,补充了 2011 年水利普查中骨干坝的建坝时间。未找到建坝时间的骨干坝,通过查找该骨干坝附近与其淤积等特征相近且具有建坝时间的骨干坝进行对比,估算该骨干坝的建坝时间。2011 年水利普查数据资料翔实,可信度高,是本研究中淤地坝数据的主要来源。

但 2011 年水利普查仅逐一调查了各流域内数量相对较少的骨干坝信息,且骨干坝拦沙量为淤积总

量。因此,笔者重点开展 2 个方面研究:一是将骨干坝淤积总量进行逐年分配;二是估算骨干坝、中型坝和小型淤地坝的总拦沙量。

(1)骨干坝逐年拦沙量计算。淤地坝的淤积量主要取决于其控制范围内的土壤侵蚀模数,而土壤侵蚀模数($A=RKSLCP$)受控于降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、坡度因子(S)、坡长因子(L)、植被覆盖—管理因子(C)以及水土保持措施(水土保持措施包括了植被、工程、耕作因子,植被已分出去,耕作不考虑,此处应该用工程措施因子。此流域内的其它工程措施没有统计数据,故仅考虑梯田措施的影响)因子(P)。因大理河流域年际间 K 、 S 和 L 因子变化较小,故年际间土壤侵蚀模数的差异主要受 R 、 C 和 P 影响。对淤积总量进行逐年分配的权重系数(ω_i)计算公式^[14]为:

$$\omega_i = \frac{R_i C_i P_i}{\sum R_i C_i P_i} \quad (4)$$

式中: R 采用章文波等^[15]提出的公式进行计算($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h)$)。运用 ArcGIS,经过反距离权重插值,获得大理河流域空间连续分布的降雨侵蚀力值; C 为植被覆盖—管理因子,植被覆盖度可通过实地调查或者使用遥感影像反演获取; P 为水土保持措施因子。 i 为年份,指从骨干坝修建年份至淤积总量调查年份。

骨干坝逐年拦沙量计算公式为:

$$S_{Ki} = S_i \omega_i \quad (5)$$

式中: S_{Ki} 为骨干坝逐年拦沙量(万 t); S_i 为骨干坝总拦沙量(万 t)。

(2)淤地坝淤积效应系数。淤地坝建设一般以骨干坝为控制单元,内部布设一系列中型坝和小型坝,形成淤地坝系。定义淤地坝淤积效应系数($f_{s(i)}$):

$$f_{s(i)} = \frac{A_K n_{K(i)} + A_M n_{M(i)} + A_S n_{S(i)}}{A_K n_{K(i)}} \quad (6)$$

式中: A_K 、 A_M 和 A_S 分别为大理河流域骨干坝、中型坝和小型坝平均控制面积,取值分别为 5.00, 1.28, 0.70 km^2 ; $n_{K(i)}$ 、 $n_{M(i)}$ 、 $n_{S(i)}$ 分别为大理河流域内有拦沙能力(未淤满)的骨干坝、中型坝和小型坝数量。

淤满时间计算公式为:

$$T = \frac{1.35\lambda V}{FM} + c \quad (7)$$

式中: T 为淤地坝淤满时间(年); λ 为淤积库容占总库容的比例,骨干坝和中小型分别取 0.77, 0.88^[16]; V 为淤地坝总库容(m^3); 1.35 为泥沙容重(t/m^3); F 为淤地坝控制面积(km^2); M 为坝控流域土壤侵蚀模数($t/(km^2 \cdot a)$),本研究采用 2000 年的土壤侵蚀模数; c 为淤地坝建设时间(年)。

淤地坝总拦沙量(S_{Ti})计算公式为:

$$S_{Ti} = S_{Ki} f_{s(i)} \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 大理河流域淤地坝拦沙量变化特征

由大理河流域淤地坝拦沙量变化特征(图 2)分析表明,1954—2011 年大理河流域淤地坝逐年拦沙量呈波动式增加,其中 1978 年拦沙量最高为 3 427.86 万 t,多年平均拦沙量为 1 236.02 万 t,累积拦沙量为 7.17 亿 t,其中 1980—1989 年年均拦沙量最高为 1 893.52 万 t,是因为 1970—1979 年为大理河流域淤地坝建设高峰期,符合 10~20 年的淤地坝设计淤积年限^[17]; 2000—2009 年年均拦沙量次之为 1 756.16 万 t,这是由于在 2000 年后淤地坝建设又逐渐增加。

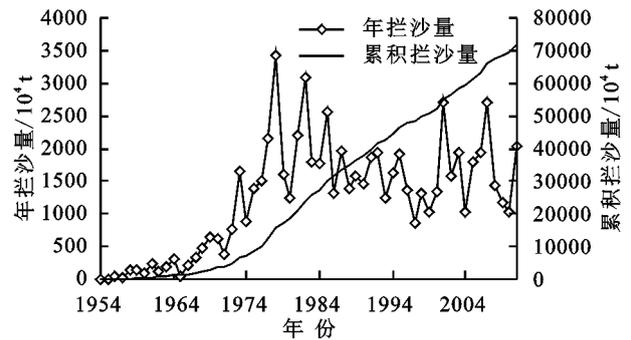


图 2 大理河流域淤地坝拦沙量变化特征

3.2 大理河输沙量变化特征

大理河流域年输沙量通过趋势检验和突变检验表明,1960—2015 年输沙量呈极显著减少趋势($P < 0.01$),且 1971 年和 2002 年发生极显著突变($P < 0.05$)。降雨—输沙双累积曲线(图 3)验证了采用 Pettitt 法分析的输沙量发生突变的年份。故将输沙量最早发生突变的 1971 年之前的天然时期(1960—1970 年)做为大理河流域基准期。

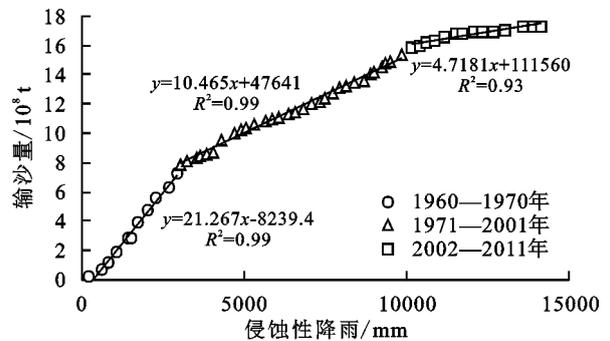


图 3 大理河流域降水—输沙量双累积曲线

3.3 人类活动对大理河流域输沙量减少的贡献率

根据基准期的回归方程(图 3),计算不同时期的输沙量(表 1)。由表 1 可知,1971—2001 年和 2002—2011 年降水对输沙量的影响比例呈减少趋势,从 12.94%降低为 -6.49%;人类活动对大理河流域年均输沙量的影响呈增强趋势,从 87.06%增加至 106.49%。

表 1 不同时期大理河流域输沙量变化原因分析

时段	实测年输沙量/ (万 t·a ⁻¹)	计算年输沙量/ (万 t·a ⁻¹)	实测年输沙量减少		降水影响		人类活动影响	
			量/(万 t·a ⁻¹)	比例/%	量/(万 t·a ⁻¹)	比例/%	量/(万 t·a ⁻¹)	比例/%
1960—1970 年	6620.96	6491.60	—	—	—	—	—	—
1971—2001 年	2603.77	6101.10	4017.19	60.67	519.86	12.94	3497.33	87.06
2002—2011 年	1605.49	6946.35	5015.47	75.75	-325.39	-6.49	5340.86	106.49

3.4 淤地坝拦沙量占人类活动影响输沙量减少的贡献率

根据淤地坝逐年拦沙量计算不同时期的年均拦沙量,并分析其占人类活动影响输沙量减少的贡献率。分析表明,淤地坝拦沙贡献率呈减少趋势(表 2),从 1971—2001 年的 47.42% 减少为 2002—2011 年的 31.04%。

表 2 不同时期大理河流域淤地坝拦沙贡献

时段	人类活动影响		淤地坝贡献	
	量/(万 t·a ⁻¹)	比例/%	量/(万 t·a ⁻¹)	比例/%
1960—1970 年	—	—	—	—
1971—2001 年	3497.33	87.06	1658.50	47.42
2002—2011 年	5340.86	106.49	1657.86	31.04

4 讨论

4.1 淤地坝拦沙量结果的合理性

熊贵枢等^[18]采用水利和水土保持措施、冉大川等^[19]采用水保法分别对 1971—1980 年和 1960—2002 年淤地坝累积拦沙量(表 3)进行了研究。熊贵枢等^[18]研究表明,其使用的某些系数由于缺乏试验资料,同时统计治理措施量数据往往偏大,故其研究结果高于相同时段本研究计算值;冉大川等^[19]研究结果略低于本研究相同时段计算值。对比表明,不同学者对大理河流域淤地坝减沙贡献率研究差异相对较小,故本研究结果合理。

表 3 大理河流域淤地坝拦沙量计算结果比较

时段	拦沙量/亿 t	文献来源
1971—1980 年	2.70	熊贵枢等 ^[18]
	1.50	本研究
1960—2002 年	1.25	冉大川等 ^[19]
	1.31	本研究

4.2 水沙关系变化对输沙量的影响

根据人类活动对大理河流域输沙量显著影响的年份,分 3 个时段分析大理河流域水沙关系变化特征。由图 4 可知,3 个时段的降雨—输沙斜率逐渐减小,即降雨对输沙量的影响逐渐减小。同时发现,1960—2015 年,降雨量呈不显著的增加趋势,而输沙量显著减少,因此,需要进一步探索水沙关系。

由图 5 可知,1971—2001 年大理河流域的径流产沙率(水沙关系的斜率)小于 2002—2011 年。结合表 3 中不同年份年均实测输沙量变化情况,表明大理

河流域 1971—2001 年较 2002—2011 年的径流产沙率小,但输沙量高于 2002—2011 年。

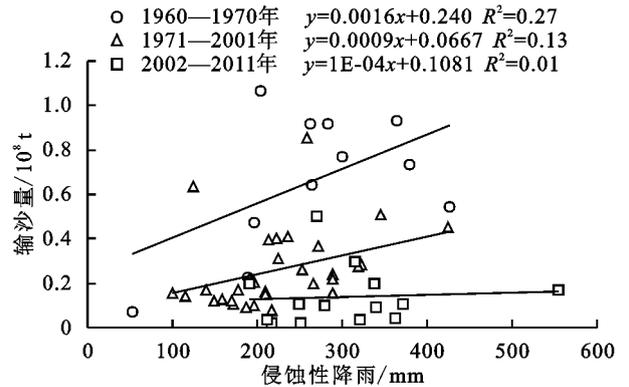


图 4 不同时段大理河流域降雨—输沙关系

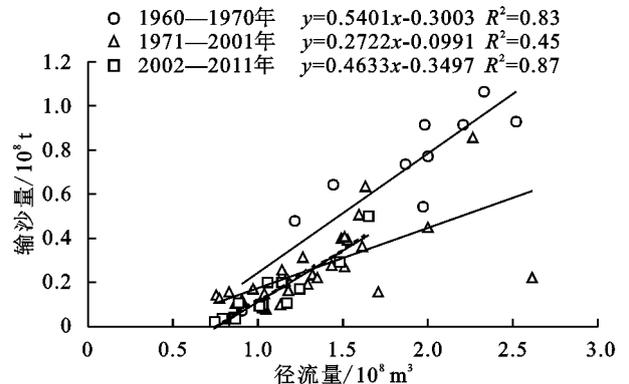


图 5 不同时段大理河流域径流—输沙关系

结合表 1 和表 2 分析输沙量变化的影响因素表明,大理河流域径流产沙率受人类活动的影响高于受降水的影响。同时,确定性系数(R^2)不同时期分别为 0.83(1960—1970 年),0.45(1971—2001 年)和 0.87(2002—2011 年)。1971—2001 年输沙量受径流量影响的占比减小,则各水保措施对输沙量的影响在增强,符合 1971—2001 年各水土保持措施大力实施情况;2002—2011 年径流对输沙量的影响在增强,但径流量和输沙量均显著减少。即输沙量减少不仅受径流量减少的影响,同时也受水土保持措施的综合影响。

4.3 各水保措施对输沙量减少的影响

常见的水土保持措施主要分为沟道措施(淤地坝工程)和坡面措施(林草+梯田措施)。1971—2001 年和 2002—2011 年,淤地坝拦沙量对大理河流域减沙贡献率由 47.42% 降到 31.04%,而人类活动对输沙量的影响从 87.06% 增加到 106.49%,故坡面措施减沙贡献率增加;已有研究^[20-21]表明,大理河流域 2002

年和2012年梯田面积分别为217.93,203.95 km²,表明梯田面积小幅减少;1999年实施退耕还林还草政策后,大理河流域NDVI由2002年开始增大(图6),林草措施减沙贡献率增加。即大理河流域2002—2011年输沙量减少可能主要是受林草措施的影响,这里暂且忽略各水土保持措施综合的影响。

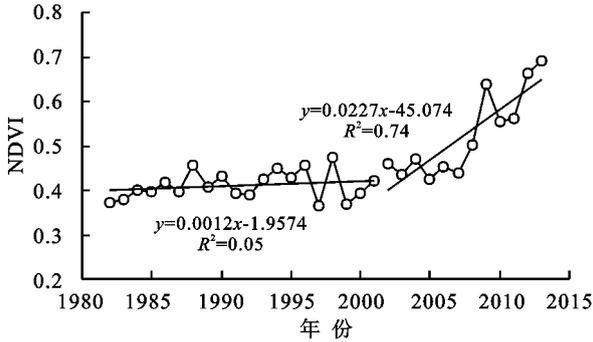


图6 大理河流域NDVI变化特征

5 结论

本研究提出的淤地坝逐年拦沙量计算方法对评价大理河流域淤地坝拦沙贡献率有一定的指导意义,可为科学认识黄河输沙量变化原因提供参考。1960—2015年大理河流域输沙量呈显著减少趋势,降雨对输沙量的影响减少,人类活动是其主要原因。1971—2001年和2002—2011年,淤地坝拦沙量对大理河流域减沙贡献率由47.42%降到31.04%,其中,1971年输沙量首次发生显著减少主要是因淤地坝的作用,而2002年输沙量再次显著减少是流域植被恢复和淤地坝的共同作用。

参考文献:

[1] 焦菊英,王万忠,李靖,等.黄土高原丘陵沟壑区淤地坝的淤地拦沙效益分析[J].农业工程学报,2003,19(6):302-306.

[2] Pal D, Galelli S, Tang H L, et al. Toward improved design of check dam systems: A case study in the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 762-773.

[3] 王宏,马勇,陈志军.河龙区间南片淤地坝对泥沙径流影响的分析与计算[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3

(1):11-17.

[4] 许炯心.无定河流域侵蚀产沙过程对水土保持措施的影响[J].地理学报,2004,59(6):972-981.

[5] 杨启红.黄土高原典型流域土地利用与沟道工程的径流泥沙调控作用研究[D].北京:北京林业大学,2009.

[6] 中华人民共和国水利部.黄河流域水文资料[M].北京:水利电力出版社,1954—2015.

[7] 穆兴民,胡春宏,高鹏,等.黄河输沙量研究的几个关键问题与思考[J].人民黄河,2017,39(6):1-3.

[8] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[9] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change: Point problem [J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.

[10] 景可,陈永宗.黄土高原侵蚀环境与侵蚀速率的初步研究[J].地理研究,1983,2(2):1-11.

[11] 江忠善,王志强,刘志.黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J].水土保持学报,1996,2(1):1-9.

[12] 谢红霞.延河流域土壤侵蚀时空变化及水土保持环境效应评价研究[D].西安:陕西师范大学,2008.

[13] 吴发启,张玉斌,王健.黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J].中国水土保持科学,2004,2(1):34-37.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 高云飞,郭玉涛,刘晓燕,等.陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J].地理学报,2014,69(1):73-79.

[17] 张金铭,董荣万,刘文峰.增量效益费用比法优选确定骨干坝设计淤积年限[J].中国水土保持,2009(2):10-11.

[18] 熊贵枢,张胜利.大理河减水减沙效益初步分析[J].人民黄河,1983(1):32-36.

[19] 冉大川,李占斌,罗全华,等.黄河中游淤地坝工程可持续减沙途径分析[J].水土保持研究,2013,20(3):1-5.

[20] 冉大川.大理河流域水土保持生态工程建设的减沙作用[M].郑州:黄河水利出版社,2008.

[21] 高云飞,刘晓燕,韩向楠.黄土高原梯田运用对流域产沙的影响规律及阈值[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):46-56.