

DOI: 10.5846/stxb201811252550

梁越, 焦菊英. 黄河河龙区间退耕还林前后淤地坝拦沙特征分析. 生态学报, 2019, 39(12): - .

Liang Y, Jiao J Y. Characteristics of sediment retention by check-dams before and after the “Grain for Green” project in the He-Long Reach of the Yellow River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

黄河河龙区间退耕还林前后淤地坝拦沙特征分析

梁 越^{1,3}, 焦菊英^{1,2,*}

1 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, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:为探究黄河中游河龙区间退耕还林工程实施前后淤地坝拦沙变化特征,本研究采用实地测量和文献集成分析相结合的方法,分析了退耕前后多个时段河龙区间不同分区淤地坝的拦沙特征。结果表明:退耕后,河龙区间北部、中部和南部淤地坝平均拦沙模数分别为 $7138.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $2596.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $4230.9 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,比退耕前分别减少了 49.5%、84.1% 和 52.1%,且均显著小于退耕前,坝控流域侵蚀程度总体上由极强烈侵蚀、剧烈侵蚀和极强烈侵蚀分别转变为强烈侵蚀、中度侵蚀和轻度侵蚀;退耕前河龙区间中部和南部淤地坝拦沙模数随时间推进显著降低;退耕后河龙区间北部淤地坝拦沙模数随时间推进而下降。未来河龙区间淤地坝建设应根据小流域侵蚀产沙现状适当缩减规模,以免造成水土资源浪费,影响下游的用水安全。

关键词:河龙区间;退耕还林;淤地坝;拦沙量

Characteristics of sediment retention by check-dams before and after the “Grain for Green” project in the He-Long Reach of the Yellow River

LIANG Yue^{1,3}, JIAO Juying^{1,2,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Hekouzhen-Longmen Reach (He-Long Reach) in the middle of the Yellow River is the primary source area of sediment of the Yellow River. Check-dams are a widely used measure for controlling soil and water losses in this area. To explore the response of sediment retention by check-dams to the “Grain for Green” project in the He-Long Reach, the authors investigated the sediment deposition of eleven check dams and collected the data of sediment yield from another twenty-nine check dams using literature integration. The results indicated that the average annual dam-trapped sediment yields in the northern, middle, and southern region of the He-Long Reach all tended to decline over time and were drastically different between different periods. After the “Grain for Green” project, the average annual dam-trapped sediment yields in the northern, middle, and southern region of the He-Long Reach were $7138.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $2596.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, and $4230.9 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively, which decreased by 49.5%, 84.1%, and 52.1% compared to those before the project, respectively. Furthermore, the average annual dam-trapped sediment yields in different regions of the He-Long Reach were all significantly less than those before the “Grain for Green” project. The overall soil erosion severity on dam-controlled watersheds in the northern, middle, and southern region of the Reach turned into high, moderate, and moderate

基金项目:国家重点研发计划项目课题(2016YFC0501604);国家自然科学基金面上项目(41771319)

收稿日期:2018-11-25; **网络出版日期:**2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

from very high, severe, and very high, respectively. Before the “Grain for Green” project, the average annual dam-trapped sediment yields in the middle and southern regions of the He-Long Reach both declined over time, being drastically different between different periods. Among the three sub-zones in the Reach, the effects of the “Grain for Green” project on reducing sediment yield increased in the following order: the northern region < the southern region < the middle region. This research demonstrates that the “Grain for Green” project and erosion control practices can both effectively reduce erosion sediment yield of small watersheds. In future, the construction of check-dams in the He-Long Reach of the Yellow River should be appropriately reduced to save soil and water resources and guarantee water security downstream.

Key Words: He-Long reach; Grain for Green; check-dam; dam-trapped sediment yield

黄河中游河龙区间是黄河流域水土流失最严重的区域,也是黄河泥沙的主要来源区^[1-2]。为控制水土流失,国家在河龙区间进行了梯田、淤地坝、水库等一系列水利水保工程建设^[3],其中淤地坝是黄土高原治理水土流失广泛使用的沟道治理措施^[4]。淤地坝在拦泥保土、淤地造田以及合理利用水资源等方面成效显著,大规模建设淤地坝,在治理水土流失、减少入黄泥沙、改善生态环境等方面具有不可替代的重要作用^[5]。现阶段,尤其是退耕还林(草)工程实施以来,林草覆盖率显著提高^[6],土壤侵蚀程度降低^[7],生态环境明显改善。退耕后黄土高原 34% 的区域土壤侵蚀率下降,48% 的区域土壤侵蚀率不变,18% 的区域土壤侵蚀率轻微增加,且强烈侵蚀的区域收缩而轻微侵蚀的区域扩张^[8];在吴起县,退耕后平均土壤侵蚀模数比退耕前减少了 45.96%,每年可减少土壤侵蚀量约 1704 万 t^[9];在模拟年降雨条件下,榆林市 2013 年土壤流失总量比退耕前的 2000 年和 2001 年分别减少了 40% 和 41%^[10]。

因此,当前是否应该继续进行大规模的淤地坝建设引起学者们的广泛探讨。在当前的侵蚀环境下,很多坝控流域实际侵蚀模数小于设计值,淤地坝大量空置,坝内多有积水而无法利用^[11],造成经济资源和水土资源的双重浪费;如果全面按照淤地坝建设规划实施,截至 2020 年,淤地坝建设将减少 43 亿 m³ 的水量进入黄河^[12],严重影响下游的用水安全。退耕前后河龙区间淤地坝拦沙的变化究竟如何?当前河龙区间淤地坝拦淤潜力如何?今后淤地坝的建设应该如何规划?这些问题的解决对未来河龙区间水土保持措施配置、水土保持投资规模和方向无疑具有重要的参考意义。然而,目前关于退耕还林(草)工程前后淤地坝拦沙变化的研究还较少涉及,且现有的研究一般是针对单个淤地坝开展的^[13],样本量小,偶然性大,不足以代表区域淤地坝拦沙变化的整体规律。

鉴于此,本研究通过对延河流域和皇甫川流域多个典型淤地坝的淤积量进行实地测量,同时结合已发表文献中河龙区间淤地坝拦沙数据的收集,分析河龙区间淤地坝退耕前后拦沙的变化特征,探明当前河龙区间淤地坝淤积速度和拦淤潜力,以期对未来河龙区间淤地坝建设规划、水土保持治理和生态文明建设以及退耕还林还草工程的水土保持效应评价提供依据。

1 材料与方法

1.1 淤地坝拦沙数据来源

作者团队近年来在陕北安塞县坊塌、马家沟小流域以及皇甫川流域特拉沟、满红沟小流域对建于 1975—2013 年间的 11 座典型淤地坝进行了实地测量(表 1),并计算了淤积总量和拦沙模数。

同时,从 CNKI、百度学术与中国学位论文全文数据库中以“黄土高原”、“淤地坝”、“Loess Plateau”与“Check dam”等为关键词搜集了国内外近 20 年来发表的有关淤地坝拦沙的文献,筛选具有淤地坝拦沙量详细数据的文献,整理淤地坝位置、名称、控制面积、运行时段、淤积量和拦沙模数等信息。共筛选了 15 篇文献,包括 29 个淤地坝(表 1)。

表 1 用于分析的淤地坝及其拦沙情况

Table 1 The check dams for analysis and their retaining information

区域 Region	县(区) County	小流域 Small watershed	坝控面积 The area of dam-controlled watershed/km ²	淤积总量 Sediment deposited/t	运行时段 Running period	拦沙模数 Dam-trapped sediment yield/ (t m ⁻² a ⁻¹)	参考文献 Reference
中部	子洲县	花梁坝	1.62	813620	1973—1995	21884.9	[14]
		黄土洼	2.4	214320	2000—2011	8116.1	[15]
	绥德县	关地沟	0.04	4644.4	1959—1963	26051	[16]
				8386.3	1964—1978	13440	
				4529	1979—1987	12702	
				66703.6	1957—1964	16578.5	
		王茂沟支沟	0.18		1965—1983	6062.9	[17]
					1984—1990	19127.5	
					1960—1964	26220	
					1965—1983	5590	
		埝堰沟	0.18	—	1984—1990	19130	[18]
					1959—1961	28050	
					1962—1976	5240	
					1977—1998	12530	
南部	横山区	王窑则	2.4	1792.7	1999—2012	650	[19]
				15484.2	1962—1976	5240	
				54305	1977—1998	12530	
				1792.7	1999—2012	650	
	清涧县	呼家岔	3.03	—	2007—2012	1050	[11]
				—	2008—2012	570	
	宝塔区	羊圈沟	2	202604	1979—2004	4052.1	[20]
				1079000	1958—1968	23751	
		王家沟	4.13	338000	1973—1978	9220	[21]
				624000	1974—1986	6977	
		新庄科	6.88	234000	1976—1984	4140	
				156000	1971—1980	12381	
		碾庄 2	6.28	234000	1979—1986	8528	
				260000	1982—1990	10031	
		碾庄 3	1.26	—	1973—1977	16291	[22]
				255792.3	1975—1979	6090.3	
	子长县	坊塌 1 号	8.4	388274.4	1980—1989	4622.3	作者团队
				34110.5	1990—1999	1804.8	
		坊塌 3 号	2.1	49513.9	1990—1999	3198.6	
				50179.7	2006—2014	3767.2	
		坊塌 4 号	1.72		2013—2014	6065	
				27937.8	2008—2014	2280.6	
		马家沟芦渠	1.75		2010—2014	3112.3	
				35653.2	2004—2014	2868.3	
北部	准格尔旗	马家沟洞儿沟	1.13		2013—2014	7470.9	
				306670.0 *	1960—1970	12696	
		云台山沟	2.42	458165.6	1970s—1980s	10371	[23]
				165000	1958—1972	17187.5	
		魏家塔	0.64	33800	2007—2011	10610	[24]
				387450	1988—1992	24215.6	
		小石拉塔	0.68	256365	1988—1993	9495	[25]
				313200	1995—2003	8700	
		杨家沟	3.2	91665	1994—2003	8333.2	[26]
				71280	1995—2004	8910	
		小西黑岱沟	4.5	52852.5	2005—2009	2936.3	[27]

续表

区域 Region	县(区) County	小流域 Small watershed	坝控面积 The area of dam-controlled watershed/km ²	淤积总量 Sediment deposion/t	运行时段 Running period	拦沙模数 Dam-trapped sediment yield/ (t m ² a ⁻¹)	参考文献 Reference
		白家门沟	0.48	6508.3	2005—2009	2711.8	
		鲁家沟	0.72	9018	2005—2009	2505	
		特拉沟园子沟	1.52	138451	2012—2014	10120.7	作者团队
		特拉沟大杨沟	0.69	32496.1	2013—2014	9419.2	
	府谷县	满红沟 1 号	6.78	405128.2	1976—1979	14938.4	作者团队
				249533.8	1981—1984	9201.1	
		满红沟 2 号	6.1	447067.9	1985—1989	14658	
				768681	1990—1998	15751.7	
		满红沟麻耗沟	0.32	62836.7	1981—1989	21818.3	
				45039.6	1990—1997	20107	

* 将原文为淤积体积的换算为淤积量,其中,安塞云台山沟取泥沙容重为 1.3 g/cm³

1.2 淤地坝拦沙数据分析

本研究采用分区分时段的方法对河龙区间淤地坝拦沙进行对比分析,即将作者团队实地测量和文献搜集的淤地坝拦沙模数数据划分为不同分区不同时段并计算其平均值,其中各个淤地坝按照其运行时段参与不同时段拦沙模数的计算。

本研究将 1999 年及以前的时间认定为退耕前的阶段,将 2000 年及以后的时间认定为退耕后的阶段^[28];根据学者对水土保持政策和治理阶段的划分^[29]结合文献中淤地坝的运行时段,进一步将各坝退耕前计算时段分为 1950—1963 年、1964—1978 年、1979—1999 年三个时段;将退耕后计算时段分为 2000—2004 年(退耕初期)以及 2005 年以后(退耕中后期)两个时段^[30]。参考以往文献中对河龙区间地理空间的划分^[31],将河龙区间河口镇到吴堡区间划分为河龙区间北部,将吴堡到龙门之间的无定河流域及其周边划分为河龙区间中部,将吴堡到龙门之间的其他区域划分为河龙区间南部。

由于拦沙模数数据不服从正态分布且方差不齐,故使用 Kruskal-Wallis 检验进行非参数检验和两两比较分析(sig=0.05)来对比不同时段淤地坝拦沙模数的差异。本文使用 Excel 2010、SPSS 20.0 和 Origin 9.0 软件进行统计分析和作图。

1.3 植被覆盖度的来源与处理

本研究利用坝控流域的植被覆盖度作为淤地坝拦沙的影响因素,使用的植被覆盖度(FVC)数据来源于中科院遥感与数字地球研究所数字农业研究室,利用像元二分法产生。由于每年夏季是植物典型的生长季,植被覆盖最好^[32],所以分别利用 1990 年、2002 年和 2013 年 7 月份的植被覆盖度数据来代表退耕前后 1979—1999 年、2000—2004 年和 2005 年之后三个时段植被覆盖度的平均情况。其中各淤地坝坝控流域的植被覆盖度利用 Arcgis 10.1 进行提取。

2 结果与分析

2.1 退耕还林(草)前后淤地坝拦沙变化特征

退耕后河龙区间北部、中部和南部淤地坝年均拦沙模数比退耕前分别减少了 6991.3 t km⁻² a⁻¹ (49.5%)、13757.8 t km⁻² a⁻¹ (84.1%) 和 4610.7 t km⁻² a⁻¹ (52.1%) (图 1),三个分区退耕后的淤地坝拦沙模数均显著小于退耕前($P < 0.05$);根据水利部的水力侵蚀程度分级标准(SL190—2007),退耕后河龙区间北部、中部和南部坝控流域总体上侵蚀程度分别由极强烈侵蚀、剧烈侵蚀和极强烈侵蚀转变为强烈侵蚀、中度侵蚀和中度侵蚀。退耕后河龙区间中部淤地坝拦沙模数为 2596.5 t km⁻² a⁻¹,河龙区间南部是中部的 1.6 倍(4230.9 t km⁻² a⁻¹),河龙区间北部是中部的 2.7 倍(7138.5 t km⁻² a⁻¹),均超过了西北黄土高原地区的容许土壤流失量

($1000 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。综上所述,退耕还林(草)工程在河龙区间小流域的减沙效应表现为:中部 > 南部 > 北部。

2.2 退耕还林(草)前淤地坝拦沙特征

河龙区间北部、中部和南部淤地坝退耕前的平均拦沙模数分别为 $14129.8 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $16354.4 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $8841.7 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其坝控流域总体的侵蚀程度分别属于极强烈侵蚀、剧烈侵蚀和极强烈侵蚀。河龙区间南部和中部在 1950—1963 年、1964—1978 年、1979—1999 年三个时段内的淤地坝拦沙模数分别为 $18223.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $13404.9 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $5419.2 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $24224.9 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $10443.6 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $17074.9 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随时间推进均呈现减小的趋势,且不同时段内的淤地坝拦沙模数存在显著性差异($P < 0.05$) (图 2)。河龙区间北部淤地坝拦沙模数在三个时段内的淤地坝拦沙模数分别为 $17187.5 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $14165.6 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 、 $14119.0 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随时间推移变化幅度不大,且不存在显著性差异($P > 0.05$)。

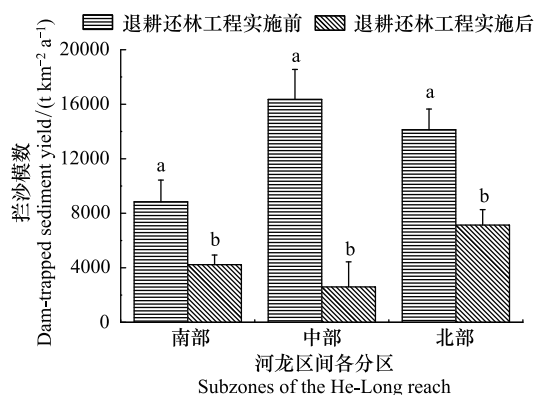


图 1 河龙区间各分区退耕前后淤地坝拦沙变化特征

Fig.1 The variation of retained sediment amount before and after the “Grain to Green” project on different subzones in the He-Long Reach of the Yellow River

不同字母表示不同时段淤地坝拦沙模数存在显著性差异;误差棒表示标准误差

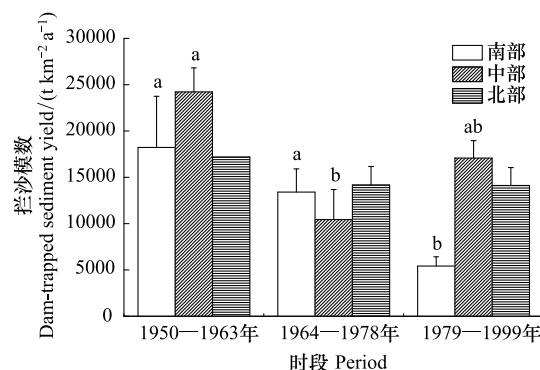


图 2 河龙区间各分区退耕前淤地坝拦沙模数

Fig.2 Retained sediment amount in different periods before “Grain to Green” project on different regions in the He-Long Reach of the Yellow River

2.3 退耕还林(草)后淤地坝拦沙特征

退耕还林(草)工程实施后,河龙区间南部和中部在两个时段的淤地坝拦沙模数变化不大,坝控流域的侵蚀程度总体上均处于中度侵蚀;河龙区间北部在退耕后两个时段的淤地坝拦沙模数分别为 $8647.7 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $5776.8 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随时段推进变化呈现降低的趋势,2005 年之后的淤地坝拦沙模数比 2000—2004 年减少了 33.2% (图 3),但不同时段内的淤地坝拦沙模数无显著性差异($P > 0.05$)。退耕后河龙区间北部淤地坝的拦沙模数远大于中部和南部,而中部和南部淤地坝的拦沙模数在退耕后两个时段均较为接近。

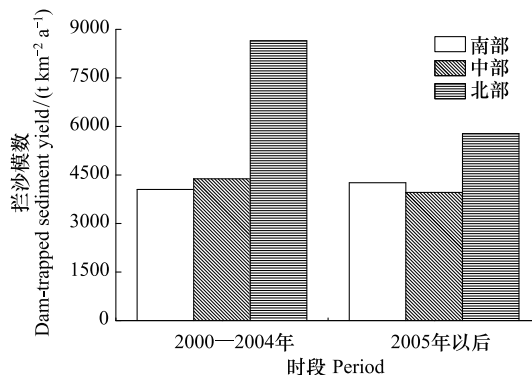


图 3 河龙区间各分区退耕后淤地坝拦沙模数

Fig.3 Retained sediment amount in different periods after “Grain to Green” project on different regions in the He-Long Reach of the Yellow River

3 讨论

流域侵蚀产沙一般受气候变化和人类活动的综合影响^[33]。由于河龙区间近 60 年来的侵蚀性降雨和降雨侵蚀力均没有发生显著性变化^[2,34],因此降雨变化并不是宏观上河龙区间退耕后小流域淤地坝拦沙量下降的主要原因,退耕后植被覆盖的变化可能是小流域侵蚀产沙量下降的主要推动力。

由图 4、5 可知,河龙区间植被覆盖度均随时段推进不断上升,而淤地坝年均拦沙模数随时段推进而不断

下降,其变化趋势与植被覆盖度相反;河龙区间北部、中部和南部的淤地坝在退耕初期(2000—2004年)年均拦沙模数总体上随植被覆盖度的上升比1979—1999年时段分别降低了38.8%、74.3%和25.2%,下降幅度很大,而从2000—2004年到2005年以后时段,河龙区间中部和南部的平均植被覆盖度分别由54%、58%上升到68%和78%,而河龙区间中部的年均拦沙模数仅下降了9.63%(422 t km⁻² a⁻¹),而南部还略有上升。这可能是由于短期淤地坝拦沙变化受降雨的年际变异影响较大,也与植被覆盖降低侵蚀产沙的作用存在临界值有关^[3,35],在河龙区间,当植被覆盖度低于50%时,侵蚀产沙量随植被覆盖度的上升而迅速下降,但当植被覆盖度超过50%之后,侵蚀产沙量则处于较低水平且趋于稳定,此时植被覆盖度继续上升对降低侵蚀产沙的作用并不明显。

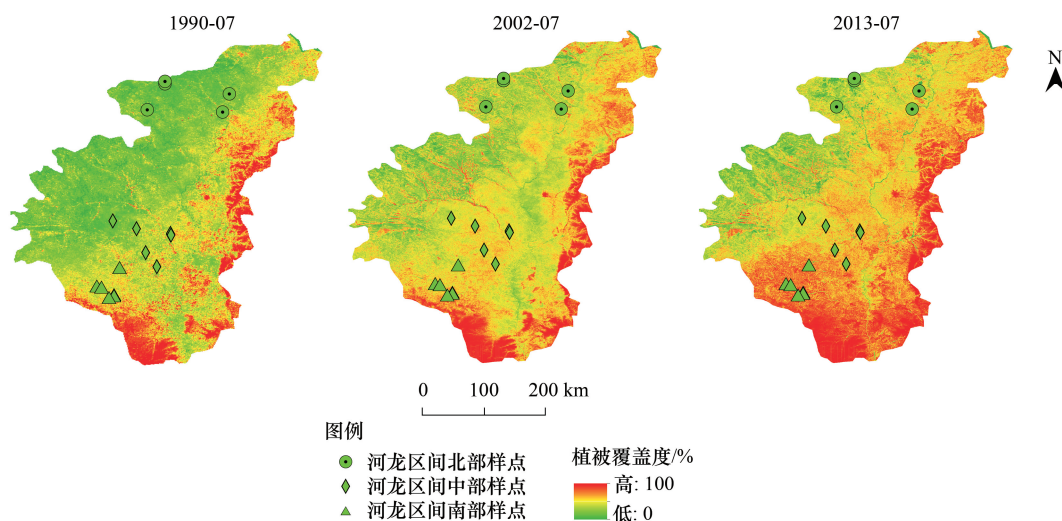


图4 河龙区间1990—2013年7月平均植被覆盖度

Fig.4 Vegetation coverage in July in He-Long Reach of the Yellow River during 1990 to 2013

此外,退耕前河龙区间小流域的坡面水土保持综合治理也明显地降低了淤地坝的拦沙量,具体表现为河龙区间北部、中部和南部在1979—1999年时段内的年均拦沙模数分别为1950—1963年的82.1%、70.5%和29.7%。小流域综合治理措施改变了流域下垫面特性及产汇流条件,不同程度地发挥了滞洪拦沙作用^[36]。综上,退耕还林(草)工程和坡面水土保持治理措施均能有效地降低小流域侵蚀产沙,削减入黄泥沙,具有较好的水土保持效应。

虽然淤地坝平均拦沙模数总体上随时间推进呈现下降的趋势,且退耕后显著小于退耕前,然而,近年来,极端暴雨事件下的小流域侵蚀产沙非常严重,依然会导致较大的淤地坝拦沙量。例如,2013年7月延河流域发生连续强降雨事件,通过旋廻层淤积量反演淤地坝的泥沙淤积过程可知,7月12日(降雨量为100mm)安塞坊塌4号坝、洞儿沟流域、阎桥流域和芦渠流域的次产

沙模数最大,分别为3756.8 t/km²、7546.0 t/km²、2843.2 t/km²和3994.3 t/km²^[37]。再如,作者团队通过对2017年无定河流域“7·26”特大暴雨事件下子洲12座淤地坝的拦沙量进行调查,发现淤地坝拦沙模数变化

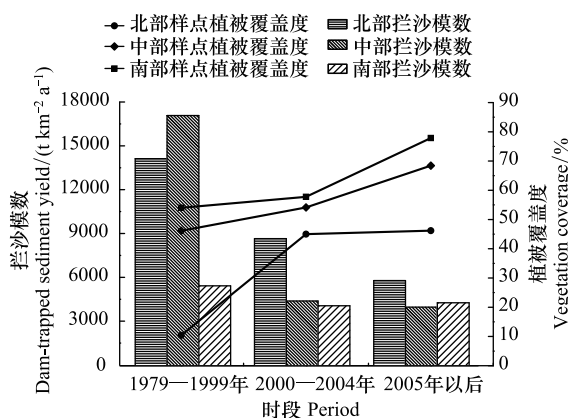


图5 河龙区间各分区坝控流域植被覆盖度与淤地坝拦沙模数关系

Fig.5 Corresponding relationship between retained sediment amount and vegetation coverage of dam-controlled watersheds in the sub-zones of the He-Long Reach of the Yellow River

在 9715.6—53920.5 t/km²之间,次降雨的淤地坝拦沙模数就远高于本文得出的河龙区间中部在退耕后的淤地坝年平均拦沙模数(2596.5 t km⁻² a⁻¹)。这表明,虽然退耕后河龙区间小流域淤地坝拦沙量整体上显著降低,生态环境明显改善,但在遭受极端暴雨事件时依然会产生极高的侵蚀产沙量,极端暴雨事件对淤地坝多年拦沙量的贡献极大。

由于退耕后河龙区间淤地坝拦沙模数显著小于退耕前,因此基于退耕前小流域侵蚀程度的淤地坝建设规模已不再适应退耕后的实际情况。退耕后河龙区间中部和南部淤地坝平均拦沙模数分别是退耕前的 15.9% 和 47.9%,坝控流域侵蚀程度总体上由剧烈侵蚀和极强烈侵蚀均转变为中度侵蚀,因此未来河龙区间南部和中部淤地坝建设应根据坝控流域侵蚀产沙的改变合理缩减规模,以免对水资源造成过度消耗,导致下游用水紧张。同时,考虑到河龙区间当前不同区域小流域的侵蚀环境,未来水土保持规划需要协调配置坡面水土保持措施和沟道治理措施,并根据当前小流域的侵蚀产沙状况,及时对淤地坝建设规划做出合理调整。

4 结论

(1) 退耕后,河龙区间北部、中部和南部淤地坝平均拦沙模数比退耕前分别减少了 49.5%、84.1% 和 52.1%,北部、中部和南部淤地坝拦沙模数均显著小于退耕前;坝控流域的总体侵蚀程度由极强烈侵蚀、剧烈侵蚀和极强烈侵蚀分别变为强烈侵蚀、中度侵蚀和中度侵蚀,退耕后植被覆盖度的提高是河龙区间小流域淤地坝拦沙模数降低的主要原因。

(2) 由于小流域的水土保持综合治理,退耕前河龙区间中部和南部淤地坝拦沙模数随时间推进均呈现减小的趋势,不同时段淤地坝拦沙模数总体上均呈现显著性差异,而河龙区间北部淤地坝拦沙模数随时间推进变化不大,且差异不显著。

(3) 退耕还林(草)工程在河龙区间小流域的减沙效应表现为:中部 > 南部 > 北部。退耕还林(草)工程实施后,黄河中游河龙区间坝控流域的侵蚀模数大幅度降低,生态环境有所改善,但河龙区间坝控流域的侵蚀模数仍然超过容许土壤流失量,尤其是河龙区间北部坝控流域侵蚀程度还处于强烈侵蚀,需要继续加大水土保持工作投入力度。

(4) 退耕后河龙区间中部和南部淤地坝年均拦沙模数分别是退耕前的 15.9% 和 47.9%,坝控流域侵蚀程度总体上由剧烈侵蚀和极强烈侵蚀均转变为中度侵蚀,淤地坝建设规模应该有所缩小以适应现阶段坝控流域侵蚀程度的变化。

参考文献(References):

- [1] 高鹏,穆兴民,李锐,王伟. 黄河河口镇至龙门区间径流、输沙量的灰色预测研究. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 53-57.
- [2] 付金霞,张鹏,郑粉莉,关颖慧,高燕. 河龙区间近 55a 降雨侵蚀力与河流输沙量动态变化分析. 农业机械学报, 2016, 47(2): 185-192, 207-207.
- [3] 信忠保,余新晓,甘敬,王小平,李金海. 黄河中游河龙区间植被覆盖变化与径流输沙关系研究. 北京林业大学学报, 2009, 31(5): 1-7.
- [4] 高海东,贾莲莲,李占斌,徐国策,赵宾华. 基于图论的淤地坝对径流影响的机制. 中国水土保持科学, 2015, 13(4): 1-8.
- [5] 付凌. 黄土高原典型流域淤地坝减沙减蚀作用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [6] 范建忠,李登科,董金芳. 陕西省重点生态建设工程区植被恢复状况遥感监测. 农业工程学报, 2012, 28(7): 228-234.
- [7] 赵文启,刘宇,罗明良,汪亚峰,吕一河. 黄土高原小流域植被恢复的土壤侵蚀效应评估. 水土保持学报, 2016, 30(5): 89-94.
- [8] Fu B J, Liu Y, Lü Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.
- [9] 郭建英,李锦荣,刘铁军,孙保平,梁占岐,赵岩. 退耕还林工程建设对吴起县土地利用/覆被变化及其土壤侵蚀的影响. 水土保持研究, 2013, 20(5): 1-6.
- [10] 杨波,王全九. 退耕还林后榆林市土壤侵蚀和养分流失功效研究. 水土保持学报, 2016, 30(4): 57-63.
- [11] 刘立峰,杜芳艳,马宁,马竹娥,王惠泽. 基于黄土丘陵沟壑区第 I 副区淤地坝淤积调查的土壤侵蚀模数计算. 水土保持通报, 2015, 35(6): 124-129.
- [12] Jin Z, Cui B L, Song Y, Shi W Y, Wang K B, Wang Y, Liang J. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau? Environmental

- Science & Technology, 2012, 46(16): 8527-8528.
- [13] 张宁宁, 刘普灵. 黄土丘陵区近 10 年典型小流域对侵蚀环境演变的泥沙响应. 水土保持学报, 2017, 31(3): 106-111, 117-117.
- [14] 魏霞. 淤地坝淤积信息与流域降雨产流产沙关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- [15] 岳大鹏, 李奎, 刘鹏, 颜艳, 李炜. 基于 RUSLE 的黄土洼小流域土壤侵蚀与水土保持研究. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 85-91.
- [16] 李勉, 杨剑锋, 侯建才, 沈中原. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究. 农业工程学报, 2008, 24(2): 64-69.
- [17] 薛凯, 杨明义, 张凤宝, 孙喜军. 利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史. 核农学报, 2011, 25(1): 115-120.
- [18] Zhao T Y, Yang M Y, Walling D E, Zhang F B, Zhang J Q. Using check dam deposits to investigate recent changes in sediment yield in the Loess Plateau, China. Global and Planetary Change, 2017, 152: 88-98.
- [19] 刘立峰, 金绥庆, 付明胜, 王喆, 王凯. 基于坝地泥沙淤积信息的流域侵蚀产沙特征研究. 山西水土保持科技, 2015, (1): 10-13.
- [20] 汪亚峰, 傅伯杰, 侯繁荣, 吕一河, 卢喜平, 宋成军, 栾勇. 基于差分 GPS 技术的淤地坝泥沙淤积量估算. 农业工程学报, 2009, 25(9): 79-83.
- [21] 李勇, 白玲玉. 黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献. 水土保持学报, 2003, 17(2): 1-4.
- [22] 冯明义, Walling D E, 张信宝, 文安邦. 黄土丘陵区小流域侵蚀产沙对坡耕地退耕响应的 ^{137}Cs 法. 科学通报, 2003, 48(13): 1452-1457.
- [23] 张信宝, 温仲明, 冯明义, 杨勤科, 郑进军. 应用 ^{137}Cs 示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(3): 405-410.
- [24] 叶浩, 石建省, 侯宏冰, 石迎春, 程彦培, 刘长礼. 基于 GIS/GPS 的淤地坝泥沙淤积速率的评价方法探讨——以内蒙古南部砒砂岩区淤地坝为例. 地质学报, 2006, 80(10): 1633-1636.
- [25] Zhao G J, Klik A, Mu X M, Wang F, Gao P, Sun W Y. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China. Geomorphology, 2015, 241: 343-352.
- [26] Zhao G J, Mu X M, Han M W, An Z F, Gao P, Sun W Y, Xu W L. Sediment yield and sources in dam-controlled watersheds on the northern Loess Plateau. CATENA, 2017, 149: 110-119.
- [27] 张艳杰, 秦富仓, 岳永杰. 西黑岱流域淤地坝拦蓄泥沙和淤积土壤有机碳储量研究. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 581-583.
- [28] 张光辉. 退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 143-154.
- [29] 谢永生, 李占斌, 王继军, 姜志德. 黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变. 水土保持学报, 2011, 25(3): 211-214.
- [30] 申强, 姜志德, 王继军. 吴起县不同退耕阶段农地资源生态服务价值评估分析. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 98-102.
- [31] 李敏, 穆兴民. 黄河河龙区间年输沙量对水土保持的响应机理研究. 泥沙研究, 2016, (3): 1-8.
- [32] 刘志红, 郭伟玲, 杨勤科, 郭艳芬, 朱小祥, 李锐. 近 20 年黄土高原不同地貌类型区植被覆盖变化及原因分析. 中国水土保持科学, 2011, 9(1): 16-23.
- [33] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. Journal of Arid Environments, 2000, 45(1): 9-20.
- [34] Gao P, Mu X M, Wang F, Li R. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(1): 1-10.
- [35] 许海超, 李子君, 林锦阔, 姜爱霞. 燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面侵蚀产沙的影响. 山地学报, 2016, 34(1): 46-53.
- [36] 王瑞芳, 秦百顺, 黄成志, 张虎林, 常丹东, 董雨亭, 赵力仪. 罗玉沟流域典型暴雨洪水及其产沙特性. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 12-17.
- [37] 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]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.