

黄土丘陵区燕沟流域水土流失治理的水沙效应

徐学选, 刘普灵, 琚彤军, 史新合, 宇苗子

(西北农林科技大学水土保持研究所, 杨陵 712100)

摘要: 黄土高原大规模的生态恢复必将对水土流失区的生态环境产生深刻影响, 其流域尺度的水文效应对理解生态环境响应尤其重要。通过对延安燕沟流域 1998—2010 年的生态系统恢复进程及其流域水沙变化过程耦合分析表明: 燕沟流域治理后径流泥沙发生了深刻变化, 尽管流域总径流仍随降雨波动, 但洪水径流显著减少, 径流中泥沙含量迅速减少, 总输沙进一步减少。这种变化趋势与流域进行的治理措施、治理阶段吻合; 梯田、坝地等工程措施使得流域径流显著减少, 林草植被恢复使得径流减少的同时, 径流含沙率减少幅度更大。工程措施配以植被措施基本可以做到泥不出沟。因此, 黄土丘陵区治理流域应该生物措施与工程措施并重, 达到控制水土流失的目的。

关键词: 径流, 泥沙, 生态, 燕沟流域, 黄土丘陵区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.03.020

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-03-0113-05

徐学选, 刘普灵, 琚彤军, 等. 黄土丘陵区燕沟流域水土流失治理的水沙效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 113—117.

Xu Xuexuan, Lu Puling, Ju Tongjun, et al. Effects of soil and water loss control on reducing runoff and sediment transport in Yan'gou watershed of Loess Hilly region[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 113—117. (in Chinese with English abstract)

0 引言

“坡改梯”和恢复植被是黄土高原小流域水土保持的有效措施^[1-4]。随着黄土高原“退耕还林还草”战略的实施, 关于实施后对区域水土资源的影响成了研究热点^[5-7], 包括淤地坝工程、其他政策行为对河流输沙变化影响的系统研究^[7-8], 小流域土地利用方式演变对流域产沙格局的深刻影响^[3,9-12], 沟道、坡地产沙贡献^[13-15]等。但以小流域为对象, 量化研究退耕还林还草工程对流域水沙变化的贡献尚少有报道, 已有研究难以甄别植被恢复与工程措施的水沙效益, 难以回答流域泥沙来源的演化与流域治理的深刻关系。在黄土高原生态恢复重大战略实施 10 余年的新形势下, 植被恢复重建后的流域环境和降雨-径流-泥沙特征将与以前不同, 流域系统的水沙收支过程及其流域水沙关系必会产生深刻变化^[9,16-18]。因而, 变化之中的环境-水沙效应研究愈来愈受到重视, 特别是黄土丘陵区生态重建对流域水沙变异关系的作用和影响。这些问题的回答对黄土高原的治理对策、治理目标等有重要的现实意义。本文以燕沟流域为研究对象, 对高度治理流域的降雨-径流-泥沙的变化特征进行初步分析研究, 期望能为加深认识降水与径流在下垫面变化后的响应情况。

收稿日期: 2011-04-19 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 重点基础研究发展计划“中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究 2007CB407205”; 中科院西部行动计划项目“黄土高原水土保持与可持续生态建设试验示范研究 (KZCX2-XB2-05)”。

作者简介: 徐学选 (1966—), 男, 陕西大荔人, 研究员, 博士。从事黄土区生态水文研究。杨陵 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

1 流域基本情况

1.1 研究流域概况

燕沟流域位于 36°28'~36°32'N、109°20'~109°35'E, 沟口距延安市 3 km, 属延河二级支流, 主沟长 8.6 km, 呈东南—西北流向, 流域面积约 47 km²。流域东南高、西北低, 海拔 986~1 425 m。地形坡度构成以陡坡地为主, 大于 25°面积占流域总面积 51.91%、15°~25°占 28.75%、5°~15°占 13.82%、5°以下占 5.52%。主沟道比降为 2.41‰, 沟壑密度 4.8 km/km², 属于典型的黄土丘陵沟壑区。

流域多年平均气温 9.8℃, 多年平均降雨量 558.4 mm, 其中, 6~9 月份降水量占全年降水量的 70%以上, 且多以暴雨形式出现, 年际变化也很大。无霜期约 170 d。天然植被为次生梢林, 破坏严重, 人工林主要由刺槐 (*Robinia pseudoacacia* L.)、杨树 (*Populus*) 以及柠条 (*Caragana korshinskii* Kom) 等灌丛组成。

土壤以黄绵土为主, 占 90%以上, 基本处于半熟化状态, 肥力低下。

流域辖 14 个行政村。在治理前 (1997 年): 流域水土流失面积为 42.55 km², 占总面积 90.72%。流域内耕地 1 831.3 hm², 人均农田 0.618 hm², 其中坡耕地面积为 1 617.6 hm², 占耕地面积的 88.3%, 15°以上坡耕地占总坡耕地的 89.5%。粮食单产仅 1 095 kg/hm²。流域侵蚀模数达 6 000~9 000 t/(km²·a), 属于强度水土流失类型区。水土流失治理面积仅 894.6 hm², 水土流失治理度仅 23.9%。垦殖指数高达 39%^[19]。

1.2 研究流域的治理情况

作为延河流域的重点治理小流域, 其治理可划分为 3

个阶段:在 1997—2000 年实施了大规模的基本农田建设,5°~15°坡耕地全修建为水平梯田,加固坝地等措施;2000—2003 年则主要实施退耕还林草工程,将 15°以上坡耕地全部退耕,种植多种乔灌木,同时扩大果园面积;2003 年以后土地利用进入微调阶段。土地利用变化见表 1。具体实施分述如下:

表 1 燕沟流域近 10 余年来土地利用变化情况
Table 1 Land use dynamic in recent 10 years in Yan'gou watershed

土地利用类型	面积/hm ²			面积比例/%			
	1997 年	2003 年	2009 年	1997 年	2003 年	2009 年	
川坝地	147.18	215.89	195.20	3.09	4.64	4.20	
耕地	梯田	66.32	587.35	655.30	1.39	12.63	14.09
	坡耕地	1617.6	127.64	23.5	33.92	2.74	0.51
园地	174.1	653.04	779.1	3.65	14.04	16.75	
林地	天然次生林	379.54	379.54	379.54	7.96	8.16	8.16
	人工乔灌林	1 078.66	1 781.19	2 007.96	22.62	38.29	43.16
草地	人工草地	0	16.79	16.79	0	0.36	0.36
	荒沟坡草地	1224	773.3	454.01	25.67	16.62	9.76
居民点	81.13	117.57	141.08	1.70	2.53	3.03	
合计	4769	4652	4652	100	100	100	

基本农田建设(见表 2):自 1997 年开始,流域进行了快速、大规模的基本农田建设,包括机修梯田、淤地坝等。很快使人均基本农田达到满足粮食自给的标准^[9]。2009 年基本农田面积稳定、略有增加,仍满足粮食自给的需要。

表 2 燕沟基本农田及其耕地变化情况
Table 2 Primary farmland and cultivated land changes of Yan'gou watershed

年份	基本农田/hm ²	人均基本农田/hm ²	耕地/hm ²	人均耕地/hm ²
1997	194.53	0.07	1 812.13	0.62
2003	803.24	0.24	930.88	0.28
2009	850.50	0.23	874.00	0.24

快速林草植被建设:从表 1 可知,燕沟流域在 2000 年实现基本农田的建设目标后,进行了流域的植被快速恢复重建。主要表现在 2003 年增加林草面积 700 hm²,该年人工林草面积占流域总面积达 38.29%,2009 年则接近到 1997 年的 2 倍,占流域面积 43.16%。

治理后(2009 年):耕地面积 875.77 hm²,林地面积为 2 280.79 hm²,草地面积 446.03 hm²,果树面积 779.1 hm²。农村经济以种植业和果业为主体,2009 年农村人均收入约为 3100 元。同时为了增加农民收入,果园面积大幅增加。形成新兴支柱产业,帮助农民致富。

2 治理流域的水沙效应

燕沟流域经过工程措施为先导的治理后,林草措施立即跟上,形成了基本农田保障粮食、植被措施保护生态、苹果产业促进农民致富的治理样板。这种流域管理的实践如何影响了流域的水沙情势,其水沙变化具体特征如何?本文采用燕沟坝口站径流泥沙监测资料、流域

降雨资料进行系统分析。

2.1 流域降水量的年变化

将流域 1998—2010 年降水资料进行统计,以 6—9 月为汛期,其他月份为非汛期,将发生洪水径流的次降雨量合计为洪水雨量,结果如图 1。图 1 显示,燕沟流域近十年来年降水量围绕 480 mm 波动,出现 1998、2003、2007、2009 年的偏丰年份;1999、2004、2008 的降水偏少年份。

比较年雨量、雨季雨量、洪水雨量发现,尽管年降雨量(480.9 mm,方差 91.18)有比较大的年际变化,但雨季雨量(370.0 mm,方差 67.71)、洪水雨量(131.5 mm,方差 56.58)年际变化减小,有利于径流的稳定。年雨量与雨季雨量变化趋势密切相关($r=0.944$),达显著水平。年雨量与洪水雨量相关性不显著,但年雨量偏丰、偏少基本对应洪水雨量的偏多和偏少,既他们之间有秩相关关系。

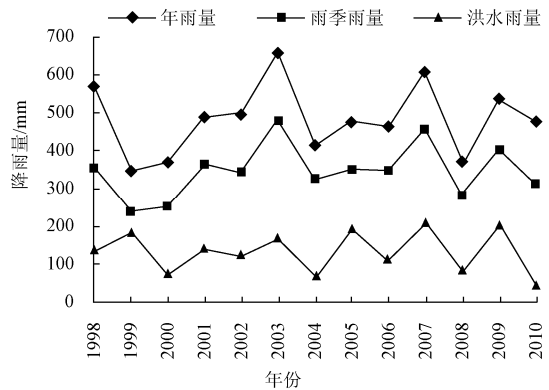


图 1 燕沟近年降雨动态

Fig.1 Precipitation of Yan'gou in recent years

2.2 流域径流各组分相关性及其年际变化分析

将河道径流划分为总径流、常流水、汛期径流与非汛期径流、洪水等组分。对降雨量与各组分径流量进行相关分析(表 3)。表 3 可知,流域径流主要与年降雨量相关,而总径流则与常流水(包括汛期和非汛期径流)关系十分密切、与洪水径流关系不显著。

表 3 燕沟流域径流组分间相关性分析
Table 3 Correlation analysis of runoff components of Yan'gou watershed

变量	年降雨量	总径流	常流水	汛期径流	非汛期径流
年降雨量	1				
总径流	0.861**	1			
常流水	0.797**	0.984**	1		
汛期径流	0.904**	0.899**	0.863**	1	
非汛期径流	0.478	0.803**	0.866**	0.496	1
洪水径流	0.064	-0.242	-0.411	-0.104	-0.605

注: ** Pearson Correlation 显著性达 0.01 水平。

将各组分径流的年动态作图(图 2):图 2 中常流水十分接近总径流,2 条曲线除了 2004—2006 年外,流域常流水在总径流中占绝对地位。说明研究流域径流主要源于前期降雨入渗到土壤和浅层地下水部分出露地表形

成，而非大的暴雨产生的洪水径流组成。即：流域基本实现了降雨就地入渗或坝地等水保措施的有效拦蓄，流域总径流与洪水径流关系变差。

不同季节径流量年变化动态可以看出：流域地表径流中除去洪水径流后的变化较小，2003 年、2007 年、2009 年的径流峰值主要由常流水（地下水出流）径流增加引起，特别是年常流水的趋势与总径流（常流水+洪水）更是十分一致。总径流曲线和常流水曲线在 2004—2006 年相差较大，应与植被恢复初期栽植的乔灌木尚小、退耕初期先锋植被尚小的实际十分对应，而 2006—2010 年间两条曲线逐渐靠近，说明流域工程和林草措施消减洪水径流的能力逐渐增强，治理的拦水效果加强。

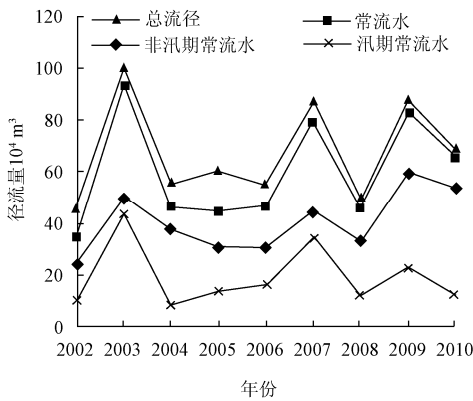


图 2 燕沟流域近年常流水动态

Fig.2 Runoff components dynamic of Yan'gou watershed

2.3 流域洪水径流变化与降雨的关系

图 3 显示：降水量存在 4 高 3 低的波动，其中 1999—2003 年为一致增加，2004—2010 年降雨量平均接近正常水平，尽管 2007、2009 年降水偏丰，2008 年偏少，但总体正常。流域洪水径流则存在 1998—2003 年的一致减少，2003—2005 的阶段增加，2005—2010 年的又一次一致性减少，它的变化并没有随降雨量发生关联变化。

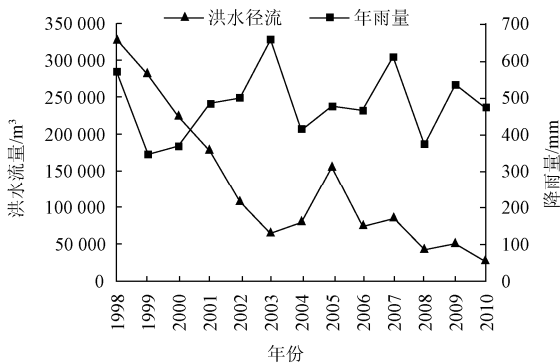


图 3 燕沟洪水径流与降雨量的关系

Fig.3 Relationship of floods flow and rainfall of Yan'gou watershed in different years

结合径流变化的特点，对照流域的治理过程，很容易发现在第一波径流减少的过程中，1997—2000 年流域完成了基本农田建设，2000—2003 年进一步完成了坡耕地退耕。既大规模的基本农田建设和坡耕地完全退耕实

现了流域洪水径流的大幅减少。减少幅度高达 60%~70%。

2004—2005 年洪水径流的有所增加，2005 年的洪水径流高峰与该年产洪的洪水雨量达到一个高值一致（图 1），既该年降雨中能够引起产流的降雨增加了，造成该年产洪增加；同时也与 2003 年后新增林草地不完全具备拦蓄水沙能力有关。此后随着林草植被生长提升了其拦蓄水沙效益，河道洪水径流进一步减少，表现为 2005—2010 年间的洪水径流再次衰减。

2.4 流域治理对泥沙输移的影响分析

燕沟洪水径流的泥沙含量动态（图 4、表 4）表明：燕沟流域在治理前洪水含沙量很高（449.2 kg/m³），随着流域治理的快速推进，洪水径流含沙量迅速降低，1998—2000 年期间降低到平均 260.4 kg/m³，2001—2003 年期间进一步 127.1 kg/m³，2004 年以来降低到 15.5 kg/m³。与此对应的流域输沙模数（表 4）大幅度减少，期末洪水径流量减少幅度为 84.6%，泥沙含量减少幅度达 96.6%，目前输沙模数仅为治理前的 1%左右，减少了 99%。

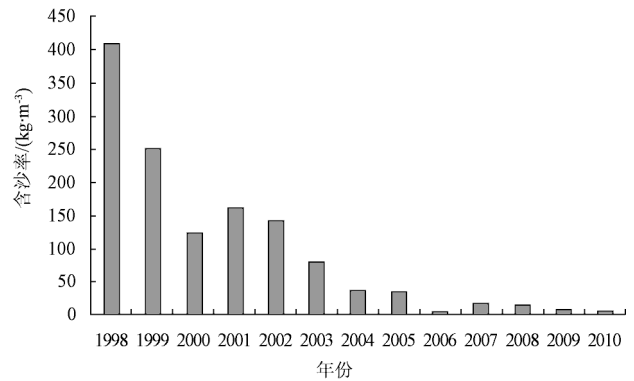


图 4 燕沟流域洪水径流的含沙率变化

Fig.4 Flood flow sediment content of Yan'gou watershed in different years

从表 4 可知：基本农田建设阶段流域洪水减少、洪水径流中含沙率降低，流域输沙模数大幅度减少；在退耕还林草实施阶段，这种减少趋势得以加强，幅度加大；在完成了治理任务后的维护阶段（2004—2010 年），林草植被效益得到进一步发挥，洪水径流泥沙含量极大程度减少，后期流域侵蚀模数极小。

表 4 燕沟流域水沙变化的阶段分析

Table 4 Sediment and runoff dynamic of Yan'gou watershed in different stages

年份	降雨量/mm	径流量/ ($\times 10^4 m^3$)	泥沙含量/ ($kg \cdot m^{-3}$)	输沙模数/ ($t \cdot km^{-2}$)
1998 以前	537.0	48.25	449.2	4 800
1998—2000	426.5	27.88	260.4	1 721
2001—2003	546.6	11.72	127.1	373
2004—2010	476.1	7.41	15.5	47

3 结 论

燕沟流域在 1998—2010 年期间的流域水沙变化有降雨的影响，但洪水径流和洪水泥沙含量发生变化的主要

原因应该是流域的治理行为。流域基本农田建设、退耕还林草实践均使流域洪水径流、输沙量显著减少,特别是实施林草措施后期,洪水含沙率急剧减少,使得流域基本实现了泥不出沟的理想。证明了工程措施先行、植被措施跟上的治理原则是可行的。

流域总径流与常流水、年降雨等曲线变化趋势较一致,而与洪水径流关系不密切。说明流域治理维护了流域降雨—产流的基本关系,但弱化了洪水径流与降雨的内在关系,其治理措施主要通过拦蓄降雨,促使其入渗土壤,进而转化为地下等过程实现了对侵蚀性降雨的产流控制,而无论是非汛期、汛期的常流水等均变幅收窄,维护了流域总径流仍具有一定规模。说明治理措施对流域水文环境影响正面。

在流域治理后期,流域输沙减少主要通过降低径流中的含沙率来实现,并且在2000年后输沙模数持续减少,而且效果愈来愈明显。说明植被对土壤具有了愈来愈强的保护作用,植被不仅吸收部分降雨、增加土壤入渗,也阻止土壤被水力侵蚀。

本研究没有考虑植被恢复进程中盖度变化的影响,同时降雨雨强因素对流域洪水泥沙也未深入分析。

[参 考 文 献]

- [1] 焦菊英,王万中,李靖.黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(3):59-63.
Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jing. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in loess hilly region[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(3): 59-63. (in Chinese with English abstract)
- [2] Zhou Zhengcao, Shangguan Zhouping. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control [J]. Pedosphere, 2008, 18(1): 131-136.
- [3] 徐学选, 据彤军, 郑世清. 延安燕沟流域次降雨泥沙来源分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 38-42.
Xu Xuexuan, Ju Tongjun, Zheng Shiqing. Sediment sources analysis of the Yangou watershed under a certain rainstorm event in the Hilly-gully Region of Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(3): 38-42. (in Chinese with English abstract)
- [4] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200-203.
- [5] 陈浩. 流域系统水沙过程变异规律研究进展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 102-107.
Chen Hao. Study progress of runoff and sediment process variation law on basin system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(5): 102-107. (in Chinese with English abstract)
- [6] 傅伯杰, 邱阳, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
Fu Bojie, Qiu Yang, Wang Jun, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the loess plateau, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 717-722. (in Chinese with English abstract)
- [7] Feng Mingyi, Walling DE, Zhang Xinbao, et al. A study on responses of soil erosion and sediment yield to closing cultivation on sloping land in a small catchment using Cs-137 technique in the Rolling Loess Plateau, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): 2093-2100.
- [8] He Xiubin, Zhou Jie, Tang Keli, et al. Yellow River sediment response to human disturbance in the last century [J]. River Basin Management III, 2005, 83: 575-581, 648.
- [9] Zhou Zhengchao, Gan Zhuoting, Shangguan Zhouping, et al. China's grain for green program has reduced soil erosion in the upper reaches of the yangtze river and the middle reaches of the yellow river [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2009, 16(4): 234-239.
- [10] Zheng Fenli. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau [J]. Pedosphere, 2006, 16(4): 420-427.
- [11] Zheng Mingguo, Cai Qiangguo, Cheng Qinjuan. Modelling the runoff- sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. Geomorphology, 2008, 93(3/4): 288-301.
- [12] Zhang Xiaoming, Cao Wenhong, Guo Qingchao, et al. Effects of landuse change on surface runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3): 283-293.
- [13] 据彤军, 刘普灵, 王栓全, 等. 黄土区不同地类坡面水沙动态过程及其发生机理的模拟实验研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1942-1947.
Ju Tongjun, Liu Puling, Wang Shuanquan, et al. Simulative study of process and principle of runoff-sediment yield in different landuse types in loess region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(5): 1942-1947. (in Chinese with English abstract)
- [14] Zhang Ouyang, Feng Xiufu, Xu Jiongxin. Impacts of flood events in coarse sediment-producing areas on channel siltation and fluvial process of the lower Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2007, 22(2): 142-149.
- [15] Xiao Peiqing, Zheng Fenli, Yao Wenyi. Effects of hillslope runoff and sediment on gullyslope erosion process. proceedings of the 4th international yellow river forum on ecological civilization and river ethics[C]/Vol Iii, 2010: p. 163-167, 411.
- [16] 据彤军, 刘普灵, 郑世清. 黄土丘陵区生态恢复重建过程中流域降雨及其水沙变化特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 57-60.
Ju Tongjun, Liu Puling, Zheng Shiqing. Study on changing characters of rainfall and runoff-sediment in process of eco-environment reconstrucion in watershed of loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 57-60. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张晓明, 余新晓, 武思宏, 等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用/土地覆被变化水文动态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 414-423.

- Zhang Xiaoming, Yu Xinxiao, Wu Sihong, et al. Response of land use/land cover change to hydrological dynamics in typical watershed in Loess gullied-hilly region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 414–423. (in Chinese with English abstract)
- [18] Schilling Keith E, Jha Manoj K, Zhang Youkuan, et al. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: Historical effects and future directions [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: 1–12.
- [19] 据彤军, 刘普灵, 郑世清, 等. 燕沟流域水土流失治理及其效益分析[J]. *西北农林科技大学学报*, 2003, 31: 65–72.
- Ju Tongjun, Liu Puling, Zheng Shiqing, et al. Study on harnessing of soil and water loss and analysis of benefits in Yan Gully watershed [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31: 65–72. (in Chinese with English abstract)

Effects of soil and water loss control on reducing runoff and sediment transport in Yan’gou watershed of Loess Hilly region

Xu Xuexuan, Liu Puling, Ju Tongjun, Shi Xinhe, Yu Miaozi

(*Institute of soil and water conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China*)

Abstract: The large-scale ecological restoration will lead to significant effects on regional eco-environment in the loess plateau. Its effect on the watershed hydrology is particularly important to understand the ecological environment changes. The objective of this study was to understand the runoff and sediment changes after soil and water conservation measures had been used in Yan’gou watershed in the loess hilly region. The data of restoration process, sediment and runoff dynamic from 1998 to 2010 were analyzed. Results indicated that the runoff-sediment in Yan'gou watershed have had a significant change after management. Although the total runoff still fluctuated with precipitation, the flood flow, sediment load and total sediment discharge decreased significantly. This tendency was consistent with the stage and methods of management in this region. Terrance and other engineering measures sharply reduced the runoff, and ecological measures not only reduced the runoff, but also led to a large amount of reduction on sediment content. Thus, we should combine engineering and ecological measures, so as to effectively control the soil erosion in loess hilly region.

Key words: runoff, sediments, ecology, Yan’gou watershed, loess hilly region