

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20140375

黄土丘陵第Ⅲ副区典型流域水沙演变过程及其驱动因素分析

寇馨月¹ 王玉杰¹ 张晓明² 王云琦¹ 赵 阳² 成 晨²
(1 北京林业大学水土保持学院 2 中国水利水电科学研究院)

摘要:流域水沙演变过程是构建区域水土流失模型及评价水土保持措施效益的基础。为探讨气候与下垫面变化对流域水沙变化的影响,以黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区罗玉沟流域为例,采用水文要素累积距平、Mann-Kendall 趋势性检验和双累积曲线等方法,分析了1986—2010年间流域水沙关系演变过程及驱动因素,并定量分析了驱动因素的影响。结果表明:1)流域径流量在1993年发生突变,其中1994—2010年(后期)较1986—1993年(前期)不同降水水平年的径流量和输沙量减少率大多超过50%;2)土地利用结构优化可改变流域水沙过程和水沙量,而沟道淤地坝工程的运行改变了水沙搭配关系,使流域单位径流输沙量显著降低;3)降水和土地利用变化对流域径流减少贡献率分别为18.48%和81.52%;降水和土地利用变化对泥沙减少贡献率则分别为27.15%和72.85%。

关键词:水沙关系;土地利用;驱动因素;定量评价

中图分类号:S714.1 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)07-0085-09
KOU Xin-yue¹; WANG Yu-jie¹; ZHANG Xiao-ming²; WANG Yun-qi¹; ZHAO Yang²; CHENG Chen².

Runoff-sediment relationship and driving force of typical watershed in the third sub-region of hilly loess area, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University* (2015)**37**(7) 85-93 [Ch, 30 ref.]
1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing,100083, P. R. China;
2 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing,100044, P. R. China.

Research on the relationship between runoff and sediment in the watershed is the foundation of constructing the models of regional water loss and soil erosion and evaluating the benefit of soil and water conservation measures. To investigate the effect of climate and land use change on runoff-sediment relationship, we selected Luoyugou Watershed, a typical small watershed in the hilly loess region, northwestern China, as study object. Hydrological element cumulative anomaly, Mann-Kendall trend test, double mass curve and other methods were applied to analyze the evolution process of the relationship between runoff and sediment and its driving forces in the period of 1986—2010 as well as the quantitative effects of driving factors. The results were as follows: 1) An abrupt change of runoff in the watershed happened in 1993, and runoff and sediment yield during the period of 1994—2010 was reduced by more than 50% compared with that during the period of 1986—1993 under different rainfall conditions. 2) Optimization on land use structures would positively influence the hydrological process and sediment yield. Those warping dams are helpful to reduce significantly the sediment yield in a given unit of runoff through altering the relationship between runoff and sediment. 3) Precipitation and the change of landuse caused by human activities contributed to reductions in runoff by 18.48% and 81.52%, and in sediment yield by 27.15% and 72.85%, respectively.

Key words relationship between runoff and sediment; landuse; driving factors; quantitative evaluation

收稿日期: 2014-10-20 修回日期: 2015-02-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(51379008)、流域水循环模拟与调控国家重点实验室青年探索课题(2014QN04)。
第一作者: 寇馨月。主要研究方向: 水土保持。Email: yykou@126.com 地址: 100083 北京市清华东路35号北京林业大学水土保持学院。
责任作者: 张晓明, 博士, 高级工程师。主要研究方向: 土壤侵蚀。Email: zxmwwq@126.com 地址: 100048 北京市车公庄西路20号中国水利水电科学研究院。
本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

气候条件和人类活动是影响流域水文循环过程和水资源演变规律的两大驱动因素^[1-2],所引起的水文效应问题受到各国学者的广泛关注^[3-4]。气象变化以改变降水和温度的方式影响流域内水循环过程;人类活动影响下的土地利用变化通过调整地貌景观格局改变土壤入渗特性和侵蚀程度,进而影响了流域水文环境、水文过程、水量平衡以及流域生态系统的动态变化^[5-6]。近年来,气候变化和人类活动对黄土高原流域径流产沙的作用日趋明显^[7-8],既有水土保持生态工程建设对流域水文循环的良性促进,也有威胁流域健康发展的人类干扰活动^[9],因而以人类-环境耦合系统为核心的土地利用-土地覆盖动态过程的研究成为关注的焦点。目前,有关气候变化和人类活动对水沙关系影响因素的研究多集中于水文数据趋势的定性分析^[10-12],而定量分析更能直观反映出流域土地利用变化、农田水利工程措施的治理效果。由于土地覆被资料的获取既费时费力又难以定量表达,土地利用与流域侵蚀输沙关系的研究仍是流域土壤径流输沙侵蚀研究的薄弱环节。另外,黄土高原水土保持生态工程与淤地坝工程建设逐步展开,其水土保持措施效应的发挥具有一定的滞后性,因此 2000—2010 年期间水沙变化及其驱动机制需重点关注。

为探讨以上问题,本文选取了位于黄河中游黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区的典型流域罗玉沟为研究对象。罗玉沟流域沟道纵横、坡陡且长,是造成水土流失的主要地形因素;流域土质结构松散,石灰质含量较高,重力侵蚀和水力侵蚀强度较大,易产生水土流失,所有这些都是黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区水土流失的主要特点^[13]。本文通过对径流量和输沙量的突变分析,划分典型性时段,开展各时段降水因素和人为因素影响的定量研究,进而对比分析得出不同时间段内影响水沙变化的主要原因,以期对日后的

水土流失治理提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

罗玉沟流域位于黄土丘陵沟壑区第Ⅲ副区,处在甘肃天水境内,105°30′~105°45′E、34°34′~34°40′N,是渭河支流——籍河左岸的一级支流,流域面积为 72.29 km²,呈羽状沟系,海拔 1 190~1 895 m。流域内地貌形态以黄土梁状丘陵为主^[13],地面较平缓,大于 25°的坡面仅占 23.60%,多年平均(1986—2010 年)土壤侵蚀模数达 4 441.09 t/km²。该研究区属于大陆季风性气候,降水年内分配不均,冬春干旱,夏秋多暴雨,其中 5—10 月降水约占全年降水的 81.60%。研究区土壤类型可分为山地褐色土类(Ⅰ)、山地灰褐土类(Ⅱ)和冲积土类(Ⅲ)3 个土类,8 个土属,11 个土种^[14]。研究区属暖温带落叶阔叶林带,流域内植被类型丰富,主要高等植物共有 49 科 230 余种,如银白杨(*Populus olba*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、旱柳(*Salix matsudana*)、枸杞(*Lycium chinense*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum*)等^[15]。

1.2 数据采集与预处理

1.2.1 数据采集

本研究收集了罗玉沟流域 1986—2010 年的水文数据,其中,流域面雨量数据是根据布设在流域内的 9 个雨量站经泰森三角形法计算获得^[16],径流泥沙数据来源于流域出口的水文观测站(雨量站和水文站分布见图 1),所测得和计算得到的数据均保留了 2 位有效数字。流域土地利用数据则根据 1986、1995、2001 年的 TM/ETM 影像和 2008 年的 SPOT 影像,应用 Erdas 和 Arcgis 图像处理软件,采用人机交互的监督分类方法进行解译(解译精度达 76%),并在野外实地调查资料校正下获得。

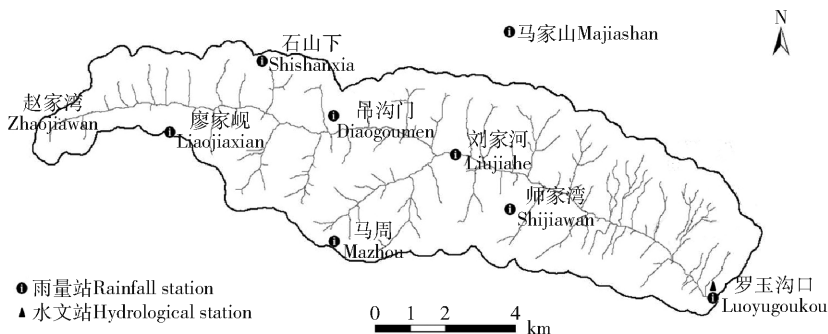


图 1 罗玉沟流域雨量站分布

Fig. 1 Distribution of precipitation stations in the Luoyugou Watershed

1.2.2 研究方法

采用 Mann-Kendall 检验法^[17-18]和累积距平法^[19-20]研究罗玉沟流域 1986—2010 年的径流泥沙变化趋势以及特征时段的划分;通过皮尔逊-Ⅲ型分布频率法^[21-22]统计分析年降水量出现频率分别为 10%、50% 和 90% 时的丰水年、平水年、枯水年;利用双累积曲线法^[22]和回归模型^[23]定量评价气候和人类活动对径流泥沙的影响。

1.2.3 数据预处理

为定量评价气候和人类活动对径流泥沙的影响,通过双累积曲线法建立降水-径流和降水-泥沙之间的回归模型(见公式(1),以降水-径流回归关系为例),并分析斜率变化得到径流泥沙的突变点,以此为依据将流域径流泥沙数据序列划分为治理前期和治理后期:

$$Q_{s1} = aP_1 + b \tag{1}$$

式中: Q_{s1} 为治理前期实测径流量,mm; P_1 为治理前期降水量,mm; a 和 b 是回归系数。我们认为在无人类影响下,治理后期降水量和径流量之间的回归关系也符合治理前期的回归模型,通过治理后期的降水量 P_2 计算治理后期的径流量 Q_2 ,此时降水量的影响为:

$$\Delta S_p = Q_2 - Q_{s1} \tag{2}$$

式中: ΔS_p 为无人类活动影响下的径流变化量, Q_2 为治理后期的计算径流量。流域径流变化总量 ΔS (治理后期的实测径流量 Q_{s2} 与治理前期的实测径流量 Q_{s1} 之差)包括人类活动的影响量 ΔS_r 和降水变化的影响量 ΔS_p ,则人类活动影响为:

$$\Delta S_r = \Delta S - \Delta S_p \tag{3}$$

1.2.4 土地利用类型变化

根据《全国土地利用分类系统》(2007),罗玉沟流域土地利用类型分为梯田、坡耕地、林地、草地、村庄、果园和水域 7 种(表 1)。其中,各期主要土地利用类型均为梯田、坡耕地、林地、草地,其面积和占地类面积超 88.00%。比较各期土地利用类型变化,1995 年的梯田和坡耕地面积与 1986 年相比变化较大,坡耕地面积减少了 77.19%,梯田的面积增加了 11.64 倍;林草面积变化较小;而其他年份的主要土地利用类型变化幅度远小于 1995 年的变化,可认为罗玉沟流域土地利用类型改变主要发生在 1995 年之前。罗玉沟流域土地利用类型变化的主要原因是国家政策引导和治理措施的展开,20 世纪 90 年代初期,坡耕地改造和退耕还林工程的启动使得土地利用方式发生了较大改变。另外,从 2000 年开始流域内增建了 16 座小型淤地坝,治理后淤地坝数量达到了 25 座,治理度高达 71.20%^[24]。

表 1 罗玉沟流域土地利用类型及变化

Tab. 1 Types and changes of landuse in the Luoyugou Watershed

土地利用类型 Landuse type	1986		1995		2001		2008		变化百分比 Percentage of change/%		
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例	1986— 1995	1995— 2001	2001— 2008
	Area/ km ²	Proportion/ %	Area/ km ²	Proportion/ %	Area/ km ²	Proportion/ %	Area/ km ²	Proportion/ %			
梯田 Terrace	3.09	4.25	39.05	53.65	39.03	53.62	39.76	54.62	1 163.75	-0.05	1.87
坡耕地 Slope farmland	49.23	67.63	11.23	15.43	11.18	15.36	9.49	13.04	-77.19	-0.45	-15.12
林地 Forestland	7.89	10.84	9.97	13.70	10.06	13.82	10.13	13.92	26.36	0.90	0.70
草地 Grassland	6.76	9.29	6.63	9.11	6.59	9.05	5.05	6.94	-1.92	-0.60	-23.37
村庄 Villages	2.69	3.70	2.68	3.68	2.69	3.70	3.25	4.46	-0.37	0.37	20.82
果园 Orchards	2.07	2.84	2.17	2.98	2.18	2.99	4.27	5.87	4.83	0.46	95.87
水域 Water	1.06	1.46	1.06	1.46	1.06	1.46	0.84	1.15	0.00	0.00	-20.75

2 结果与分析

2.1 流域水沙过程动态变化

罗玉沟流域 1986—2010 年降水量、径流量、泥沙量的变化特征见图 2。图 2 显示,1994 年之前径流和输沙的变化与降水变化具有一致性;1994 年之后在降水有所增加的情况下,径流量和输沙量呈逐

渐减小趋势。以 1994 年为分界点,采用 Mann-Kendall 检验法分别对流域 1986—1993 年(前期)、1994—2010 年(后期)降水、径流和泥沙进行趋势性分析(表 2),趋势检验结果与图 2 显示相一致,即前期降水量减少(检验统计值 Z 为负),后期降水量增加(检验统计值 Z 为正);前、后期径流量分别以每年 $5.48 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $2.68 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的速率在递减,后

表 2 不同时段罗玉沟流域径流量与输沙量 Mann-Kendall 趋势分析

Tab.2 Mann-Kendall trend analysis of runoff and sediment yield in the Luoyugou Watershed in varied periods

水文要素 Hydrological elements	1986—1993				1994—2010			
	平均值 Mean	Z	显著性水平 Significance level	年均变化速率 Average annual changing rate	平均值 Mean	Z	显著性水平 Significance level	年均变化速率 Average annual changing rate
降水量 Precipitation/mm	524. 87	-0. 03	0. 01	27. 48	501. 91	0. 69	0. 01	3. 01
径流量 Runoff/10 ⁴ m ³	364. 98	-0. 93	0. 01	5. 48	114. 58	-0. 83	0. 01	2. 68
输沙量 Sediment yield/10 ⁴ t	52. 18	-1. 14	0. 01	0. 18	22. 66	0. 00	0. 01	0. 06

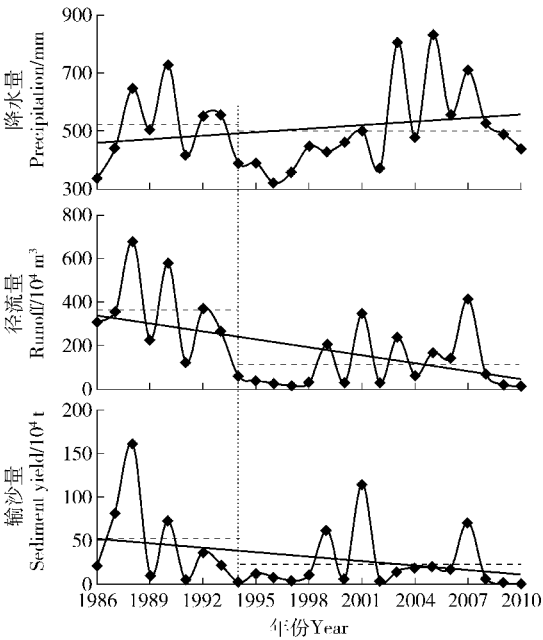


图 2 罗玉沟流域水文要素变化趋势

Fig. 2 Changing trends of hydrological elements in the Luoyugou Watershed

期较前期径流量减少率为平均每年 50. 97% ;后期输沙量年均变化速率较前期每年减少 0. 12 × 10⁴ t。

图 2 显示,罗玉沟流域的水沙变化过程具有明显的阶段性特征,而累积距平法可直观地识别出水文要素年际变化的阶段趋势^[25],为此本研究采用累积距平法对罗玉沟流域的水沙变化趋势进行分析(图 3)。图 3 曲线的峰值指示了水沙变化的突变年份。显然,径流量和输沙量变化的突变年份略有不同,分别为 1993 和 1990 年;同时,图 3 显示 1993 年也是输沙量变化的突变拐点之一。为了便于对比分析流域前期和后期的水沙关系特征,并结合图 2 显示的实测输沙量变化趋势,分别将 1986—1993 年和 1994—2010 年作为径流和输沙的 2 个典型变化阶段。由于流域的水沙变化主要受降水和土地利用格局的影响,根据表 1 显示结果,1986—2010 年期间罗玉沟流域土地利用格局在 1995 年或之前发生显著变化,其直接影响流域的水沙过程变化。因此,基

于累积距平法对水沙过程典型变化阶段的划分是可信的,土地利用格局变化的阶段划分也相应以 1993 年为界,1986—1993 年为前期,1994—2010 年为后期。

另外,图 3 显示的 2001 年均为流域径流和输沙变化的另一突变年份,该流域在 2000 年开展沟道淤地坝工程建设,并使沟道整治工程逐步完善,因此,罗玉沟流域的水沙变化与流域的土地覆被和水土保持工程措施的实行是紧密相关的。

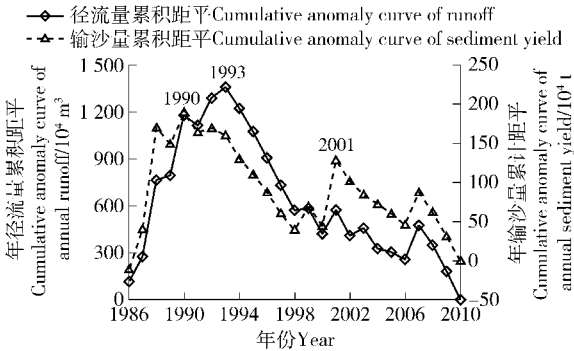


图 3 罗玉沟流域径流量和输沙量的突变特征

Fig. 3 Characteristics of abrupt changes for runoff and sediment yield in the Luoyugou Watershed

2. 2 土地利用变化对流域水沙关系的影响

2. 2. 1 土地利用变化对产流产沙量的影响

为探讨土地利用变化在不同降水频率条件下对径流泥沙的影响,利用皮尔逊Ⅲ型频率分析方法对年降水进行丰水年、平水年、枯水年划分,并对 2 期土地利用条件下丰水年、平水年和枯水年的径流和输沙进行统计,见表 3。前期与后期不同水平年相比,丰水年降水量增加了 1. 76%,平水年和枯水年的降水量分别减少 7. 15% 和 3. 18%,前、后期降水的变化并不显著。但后期的产流量和产沙量较前期均有较大幅度减少,其中,丰水年、平水年和枯水年的平均径流深分别减少 54. 50%、67. 44% 和 83. 44%,平均输沙率分别减少 51. 67%、28. 80% 和 51. 48%。显然,罗玉沟流域后期水沙量的锐减主要归因于土地利用结构的调整,即植被覆盖增加、坡耕

表 3 不同降水频率条件下径流深和侵蚀模数

Tab. 3 Runoff and erosion modulus under different precipitation frequencies

水平年 Level years	水文要素 Hydrological elements	1986—1993	1994—2010	变化率 Rate of change/%
丰水年 Wet year	平均降水 Average precipitation/mm	645. 83	657. 20	1. 76
	平均径流深 Average runoff depth/mm	70. 06	31. 88	− 54. 50
	平均侵蚀模数 Average erosion modulus/(t·km ^{−2} ·a ^{−1})	11 928. 08	5 764. 28	− 51. 67
平水年 Normal year	平均降水 Average precipitation/mm	500. 97	465. 14	− 7. 15
	平均径流深 Average runoff depth/mm	43. 70	14. 23	− 67. 44
	平均侵蚀模数 Average erosion modulus/(t·km ^{−2} ·a ^{−1})	6 062. 24	4 316. 23	− 28. 80
枯水年 Dry year	平均降水 Average precipitation/mm	379. 30	367. 22	− 3. 18
	平均径流深 Average runoff depth/mm	29. 94	4. 96	− 83. 44
	平均侵蚀模数 Average erosion modulus/(t·km ^{−2} ·a ^{−1})	1 884. 99	914. 52	− 51. 48

地减少和坡改梯工程实施等土地利用优化措施降低了流域降水产流产沙能力。

2.2.2 2 期土地利用格局下水沙关系变化

流域内的水沙关系变化可以在一定程度上反映流域下垫面变化对径流产沙的影响^[26]。本研究以 1993 和 2001 年为分界点划分 3 个阶段探讨不同期水沙关系,即分别建立 1986—1993 年、1994—2001 年和 2002—2010 年 3 个时段年径流深与年输沙模数回归方程,基于不同时期回归斜率的差异性,探讨不同土地利用条件下水沙关系变化(图 4)。

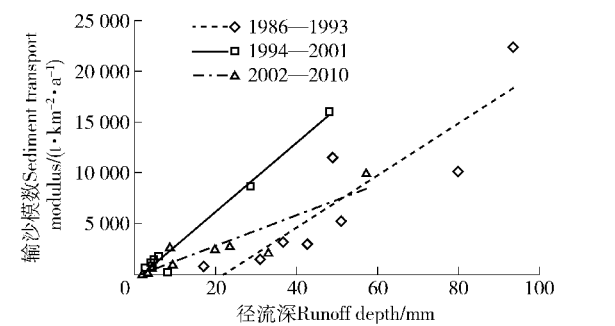


图 4 不同土地利用时段下的水沙关系

Fig. 4 Relationship between runoff and sediment yield during different land use periods

罗玉沟流域 3 个时段年径流深与年输沙模数的回归方程为:

1986—1993 年: $S_1 = 257.51Q_1 - 5\,694.8 \quad R^2 = 0.80$

(4)

1994—2001 年: $S_2 = 339.34Q_2 - 613.59 \quad R^2 = 0.98$

(5)

2002—2010 年: $S_3 = 152.41Q_3 - 269.97 \quad R^2 = 0.83$

(6)

式中: S_1 、 S_2 、 S_3 是输沙模数,t/(km²·a); Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为年径流深,mm。

用 SPSS 软件对 S_1 与 S_2 、 S_2 与 S_3 的斜率进行无差异分析,协方差统计结果显示: S_1 与 S_2 的 P 值(显著性)为 0.27,大于 0.05,即 2 条回归直线的斜率无差异,说明罗玉沟流域在 1986—1993 年和 1994—2001 年时间段的水沙关系未发生明显变化。此阶段流域治理措施变化主要为坡面的土地利用类型改变,如坡改梯和林草地面积的增加,其较好地改善了流域植被覆盖情况和土壤的抗蚀性,降低产流产沙量。在泥沙来源充沛的黄土丘陵区,由于植物措施并不能改变泥沙性质和水利系数,因而并未改变单位体积径流携沙能力^[27]。 S_2 与 S_3 的 P 值(显著性)为 0.00,小于 0.05,即 2 条回归直线的斜率差异性明显, S_3 的斜率为 152.41,仅为 S_2 的 44.91%,在流域植被覆盖较好的情况下,沟道工程建设对流域水沙关系影响显著,即由于坝前泥沙的淤积导致流域内相同量级径流的携沙能力下降。

2.3 流域水沙关系对不同降水量的响应

气象学中将降水按雨强大小分为 4 个等级,即小雨(<2.5 mm/min)、中雨(2.5~8.0 mm/min)、大雨(8.0~16.0 mm/min)、暴雨(>16.0 mm/min)。黄土高原地区只有侵蚀性降水才会产流产沙,因此,本研究首先收集了 1986—2010 年共 85 次洪峰流量大于 0.01 m³/s 的水文数据以确认筛选的降水事件为侵蚀性降水,并根据实际降水情况,划分降水等级为小雨(<2.5 mm/min)、中雨(2.5~8.0 mm/min)、大雨(>8.0 mm/min)3 个等级,分析不同雨强等级下 2 期土地利用格局的水沙关系变化(表 4、图 5)。

从表 4 可看出,后期较前期小雨和大雨的比例分别增加了 1.0 倍和 0.2 倍,中雨的比例减少了 0.35 倍,前期和后期多年平均雨强分别为 5.60 和 5.72 mm/min,变化不大。图 5 中,雨强小于 2.5

表 4 罗玉沟流域次降水统计

Tab.4 Statistics of individual rainfall in the Luoyugou Watershed

时段 Period	统计项 Items	雨强 Rainfall intensity		
		小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain
1986—1993	次数 Number of times	5	17	4
	频率 Frequency/%	19. 23	65. 38	15. 38
1994—2010	次数 Number of times	23	25	11
	频率 Frequency/%	38. 98	42. 37	18. 64

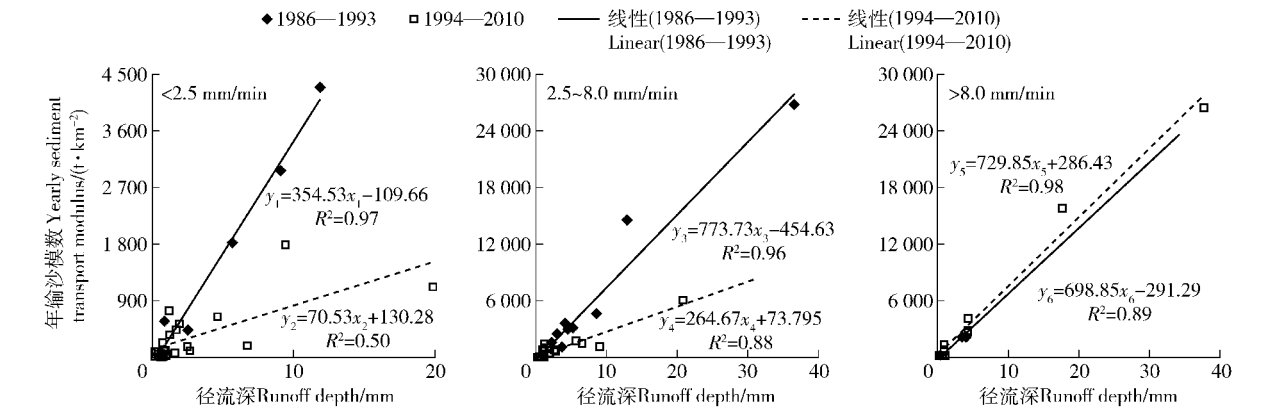


图 5 罗玉沟流域不同雨强下水沙关系

Fig.5 Relationship between runoff and sediment yield under different precipitations in Luoyugou Watershed

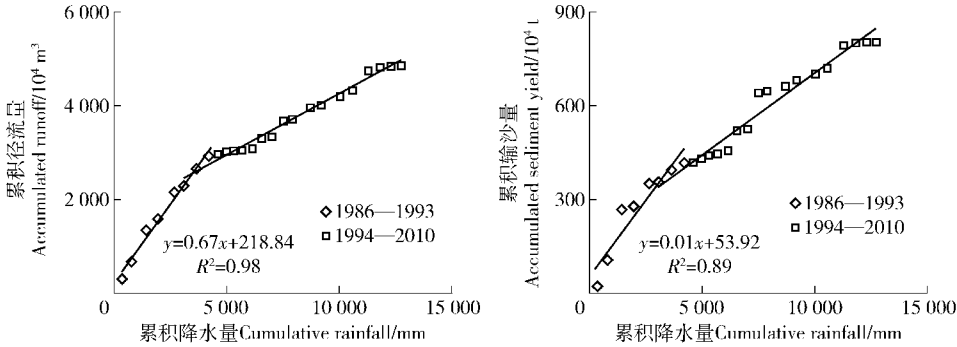


图 6 罗玉沟流域降水-径流、降水-输沙双累积曲线

Fig.6 Double accumulative curves of rainfall-runoff and rainfall-sediment yield in the Luoyugou Watershed

mm/min 时,土地利用后期水沙关系的斜率比前期减少了 80. 11%;雨强在 2.5 ~ 8.0 mm/min 范围内,斜率由前期的 773. 73 降低到后期的 264. 67,减少了 65. 79%,该结果表明流域退耕还林和坡改梯等土地利用格局优化有效地降低了小雨强和中雨强下的径流产沙能力。当雨强大于 8.0 mm/min 时,土地利用后期斜率较前期增加了 4. 32%,变化并不显著,说明流域土地利用格局优化对大雨强下径流产沙能力影响并不大。

2.4 降水与土地利用变化对流域水沙变化影响的定量评价

如何定量评价气候变化和人类活动对流域水沙变化的影响是目前流域水文研究的热点之一。对于

黄土高原地区,气候因素中的降水是影响产流产沙能力的主要指标,而人类活动也主要是通过改变流域土地利用现状来影响水文行为变化。因此,本研究通过建立降水-径流和降水-输沙的双累积曲线(图 6)回归关系,基于 1. 2. 3 中的测算方法来评价降水和人类活动对水沙变化的影响。

如图 6 所示,罗玉沟流域的降水-径流和降水-输沙双累积曲线明确显示了流域水文过程的阶段性变化,且阶段变化的拐点对应年份也正好是图 3 所反映的径流和泥沙突变年份。因此,仍按前文所确认的水沙变化 2 个时段,通过双累积曲线拟合出治理前期的降水与径流和输沙的回归关系(表 5),研究治理后期降水与人类对径流产沙的贡献率。从表

6 可以看出,治理后期,在减少径流量方面,人类活动的贡献率为 81.52%,而降水贡献率仅占 18.48%,说明人类活动影响是调节径流量的主要驱动力;在减少输沙量方面,人类活动的贡献率为

72.85%,降水变化的贡献率仅为人类活动贡献率的 37.26%,说明人类活动对减少径流产沙的贡献占绝对优势,这与目前许多研究结果相一致^[28-30]。

表 5 罗玉沟流域治理前期降水-径流(输沙)双累积曲线回归方程

Tab. 5 Regression equations of double accumulative curves for rainfall-runoff (sediment yield) during the basic period in the Luoyugou Watershed

水文要素 Hydrological elements	回归方程 Regression equation	累积实测值 Accumulative measured values	累积计算值 Accumulative calculated values	变化量 Variation	变化率 Rate of change/%
径流量 Runoff/10 ⁴ m ³	$\sum R = 0.67 \sum P + 218.84$ ($R^2 = 0.98$)	4 867.75	8 787.21	-3 919.45	80.52
输沙量 Sediment yield/10 ⁴ t	$\sum S = 0.10 \sum P + 53.92$ ($R^2 = 0.89$)	802.73	1 288.89	-486.16	60.56

注:R 表示径流量,S 表示输沙量。Notes: R means runoff, S means sediment yield.

表 6 罗玉沟流域降水与人类活动对径流和泥沙的贡献率

Tab. 6 Contribution percentages of rainfall and human activities on the runoff and sediment yield in the Luoyugou Watershed

水文要素 Hydrological elements	典型时段 Typical period	实测值年均量	计算值年均量	前后相差		降水影响 Impact		人类活动影响	
		Average annual amount of	Average annual amount of	Difference		of precipitation		Impact of human activities	
		measured values	calculated values	变化值 Change	变化率 Rate of change/%	变化值 Change	百分比 Percent/%	变化值 Change	百分比 Percent/%
径流量	1986—1993	364.99	367.93						
Runoff/10 ⁴ m ³	1994—2010	114.58	318.72	-250.41	68.61	-46.27	18.48	-204.14	81.52
输沙量	1986—1993	52.18	54.74						
Sediment yield/10 ⁴ t	1994—2010	22.66	44.17	-29.52	56.57	-8.01	27.15	-21.51	72.85

3 结论与讨论

本文分别采用了 Mann-Kendall 趋势分析检验、累积距平分析、皮尔逊-Ⅲ型分布频率分析等方法研究了罗玉沟流域的水沙过程演变特征,并辨析了土地利用变化和降水量、雨强对流域水沙关系的影响,定量评价了降水和土地利用变化对流域水沙演变的贡献以及驱动因素,得到以下几点认识:

- 1)研究区主要的土地利用类型为梯田、坡耕地、林地、草地,在增加土地植被覆盖、实施坡耕地改梯田的治理措施以及减少坡耕地面积比例后,其径流输沙量较前期有所下降。由于植被措施难以改变沟道的输沙能力和黄土丘陵沟壑区流域泥沙来源充沛的特点,因此植被措施也不会改变其水沙关系,植被的减沙效应仅通过减水来实现。而沟道淤地坝工程建设改变了流域内的泥沙特性和水利系数,对水沙关系改善效果显著,单位径流携沙能力也降低至治理前期的 44.91%。
- 2)对流域内 85 次降水的频率和雨强进行统计

分析,在研究年限内无论丰、枯或平水年,尽管 2 期土地利用期间降水有所差异,但在降水量变幅较小的情况下,后期土地利用格局下各种降水年份产流产沙量均有较大幅度的减少。土地利用格局优化后,不同雨强对径流泥沙的影响存在差异。研究结果表明,退耕还林、坡改梯及沟壑整治工程建设等流域治理措施可显著降低小雨强和中雨强的径流产沙能力,而对大雨强下的径流产沙能力影响并不显著。

- 3)通过累积距平分析发现,径流减少突变发生在 1993 年,突变后年径流量减少了 68.61%;在减少径流量方面,降水的贡献率为 18.48%,人类活动的贡献率为 81.52%。流域年输沙量呈递减趋势,其中人类活动对输沙量的减少影响较大,占比为 72.85%,降水影响仅为 27.15%。分析认为流域近十几年人类活动较为剧烈,对径流输沙变化起到主导作用。

由分析结果可知,由人类活动引起的坡耕地改梯田、林草面积增加等土地利用类型变化对罗玉沟流域径流泥沙减少具有积极作用。罗玉沟流域土地

利用变化主要是梯田、坡耕地、林地和草地的利用面积变化,本文在讨论土地利用变化对流域水沙变化的贡献率时,并未分离和评估不同利用类型对水沙变化的贡献率。细化不同利用类型对来水来沙的影响有助于科学采用治理措施,达到最佳治理效果,在以后的研究分析中将进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等.降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J].北京林业大学学报,2010,32(4):161-168.
ZHANG S H, LIU S X, MO X G, et al. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Wuding River Basin, middle reaches of the Yellow River [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32 (4): 161-168.
- [2] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.
SONG X M, ZHANG J Y, ZHAN C S, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44 (7): 779-790.
- [3] BOOTH D B, KARR J R, SCHAUMAN S, et al. Reviving urban streams: land use, hydrology, biology and human behavior [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, 40 (5): 1351-1364.
- [4] 王礼先,张志强.干旱地区森林对流域径流的影响[J].自然资源学报,2001,16(5):439-444.
WANG L X, ZHANG Z Q. Impacts of forest vegetation on watershed runoff in dryland areas [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16 (5): 439-444.
- [5] BARNETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow dominated regions[J]. Nature, 2005, 438 (7066): 303-309.
- [6] PIAO S L, CIAIS P, HUANG Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467 (7311): 43-51.
- [7] 原志华,延军平,刘宇峰.1950年以来汾河水沙演变规律及影响因素分析[J].地理科学进展,2008,27(5):57-63.
YUAN Z H, YAN J P, LIU Y F. Analysis of the runoff and sediment development distribution and influencing factor of Fenhe River during the last 50 years [J]. Progress in Geography, 2008, 27 (5): 57-63.
- [8] 万占伟,安催花,李庆国.黄河水沙变化及设计水沙条件[J].人民黄河,2013,35(10):26-29.
WAN Z W, AN C H, LI Q G. Variation characteristics and design condition of the Yellow River water and sediment [J]. Yellow River, 2013, 35 (10): 26-29.
- [9] 楚纯洁,李亚丽.近60年黄河干流水沙变化及其驱动因素[J].水土保持学报,2013,27(5):41-47.
CHU C J, LI Y L. Variation of runoff and sediment and their driving factors of the Yellow River mainstream in the past 60 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (5): 41-47.
- [10] 杨新,延军平,刘宝元.无定河年径流量变化特征及人为驱动力分析[J].地球科学进展,2005,20(6):637-642.
YANG X, YAN J P, LIU B Y. The analysis on the change characteristics and driving forces of Wuding River runoff [J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20 (6): 637-642.
- [11] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等.生态恢复对流域水沙演变趋势的影响及其程度分析:以北洛河上游为例[J].生态学报,2015,35(3):1-12.
LIU E J, ZHANG X P, XIE M L, et al. Hydrologic responses to vegetation restoration and their driving forces in a catchment in the loess hilly-gully area: a case study in the upper Beiluo River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35 (3): 1-12.
- [12] FU G, CHARLES S P, VINEY N R, et al. Impacts of climate variability on stream-flow in the Yellow River [J]. Hydrol Process, 2007, 21 (25): 3431-3439.
- [13] 张满良,张琳玲,雷鸣.黄土丘陵沟壑第Ⅲ副区罗玉沟流域水土流失监测体系建设[J].水土保持通报,2009,29(2):65-69.
ZHANG M L, ZHANG L L, LEI M. Construction of soil erosion monitoring system in Luoyugou Catchment of subdistrict Ⅲ of loess hilly and gully area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29 (2): 65-69.
- [14] 伍飞舟.黄土区罗玉沟流域土地利用变化及驱动力研究[D].北京:北京林业大学,2010.
WU F Z. Land use change and driving forces research of Luoyugou Watershed in the Loess Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [15] 韩洁春.罗玉沟流域土地利用变化的水文响应研究[D].北京:北京林业大学,2011.
HAN J C. Hydrological response on land use change in Luoyugou Watershed [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [16] 朱求安,张万昌,赵登忠.基于PRISM和泰森多边形的地形要素日降水量空间插值研究[J].地理科学,2005,25(2):233-238.
ZHU Q A, ZHANG W C, ZHAO D Z. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and Thiessen polygon analysis [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25 (2): 233-238.
- [17] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
FU Z B, WANG Q. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16 (4): 482-493.
- [18] 祝青林,张留柱,于贵瑞,等.近30年黄河流域降水量的时空演变特征[J].自然资源学报,2005,20(4):477-482.
ZHU Q L, ZHANG L Z, YU G R, et al. The spatial and temporal variability characteristics of precipitation in the Yellow River basin of recent 30 years [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20 (4): 477-482.

[19] RAN L S, WANG S J, FAN X L. 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.

[20] LI Z J, LI X B, XU Z M. Impacts of water conservancy and soil conservation measures on annual runoff in the Chaohe River Basin during 1961—2005 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(6):947-960.

[21] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京:气象出版社, 2007:36-69.

WEI F Y. Modern diagnosis and prediction of climate statistics [M]. 2nd ed. Beijing: Meteorological Press, 2007:36-69.

[22] 赵文武,傅伯杰,陈利顶,等. 黄土丘陵沟壑区集水区尺度土地利用格局变化的水土流失效应[J]. 生态学报, 2004, 24(7):1358-1364.

ZHAO W W, FU B J, CHEN L D, et al. Effects of land-use pattern change on soil and water loss at the catchment scale in the hilly and gully area of the Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(7):1358-1364.

[23] GAO P, MU X M, WANG F. 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.

[24] 张琳玲. 罗玉沟流域综合治理措施配置及效益探讨[J]. 人民黄河, 2013, 34(12):96-99.

ZHANG L L. Study of comprehensive management of Luoyugou Watershed and its effectiveness[J]. Yellow River, 2013, 34(12):96-99.

[25] 刘成,王兆印,隋觉义. 我国主要入海河流水沙变化分析[J]. 水利学报, 2007, 38(12):1444-1452.

LIU C, WANG Z Y, SUI J Y. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12):1444-1452.

[26] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等. 黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J]. 水利学报, 2007, 38(1):47-53.

ZHENG M G, CAI Q G, WANG C F, et al. Effect of vegetation and other measures for soil and water conservation on runoff-sediment relationship in watershed scale[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1):47-53.

[27] 郑明国,蔡强国,陈浩. 黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3572-3581.

ZHENG M G, CAI Q G, CHEN H. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in gullied-hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 27(9):3572-3581.

[28] 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.

JIANG Z S, WANG Z Q, LIU Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1996, 2(1):1-9.

[29] 李子君,李秀彬. 近 45 年来降水变化和人类活动对潮河流域年径流量的影响[J]. 地理科学, 2008, 28(6):809-813.

LI Z J, LI X B. Impacts of precipitation changes and human activities on annual runoff of Chao River Basin during past 45 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(6):809-813.

[30] 赵阳,余新晓,郑江坤,等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22):252-260.

ZHAO Y, YU X X, ZHENG J K, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual stream flow in Chaobai River Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22):252-260.

(责任编辑 李 契
责任编委 蔡强国)