

降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响

秦瑞杰¹, 李桂芳², 李平¹

(1. 天水水土保持科学试验站, 甘肃 天水 741000; 2. 广西大学农学院, 南宁 530005)

摘要: 为探讨降水和土地利用变化对流域水沙关系的影响, 以黄土高原丘陵沟壑区罗玉沟流域为研究区域, 利用流域 25 年(1986—2010 年)的年降水量、年径流量和年输沙量以及土地利用变化资料, 分析罗玉沟流域水沙演变规律和水沙关系变化。结果表明: 在 1986—2010 年罗玉沟流域年降水量和汛期降水量基本保持平稳, 无明显的增减趋势, 而流域年径流量和年输沙量整体呈波动递减的变化趋势, 降水与径流相关分析得出, 汛期产流产沙对流域年径流量和年输沙量影响最显著。对不同时期流域水沙变化分析, 土地利用方式改变, 主要是梯田、林草等水土保持措施, 对于流域减水减沙作用有限, 梯田和林草面积的增加并未明显改变流域水沙关系, 淤地坝等工程措施对黄土高原丘陵沟壑区流域减水减沙具有重要作用。研究结果可为黄土丘陵沟壑区水土流失治理及水土保持措施布设提供理论依据。

关键词: 降水; 土地利用; 水沙关系; 罗玉沟流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0029-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.005

Impacts of Precipitation and Land Use Change on Runoff and Sediment in Luoyugou Watershed

QIN Ruijie¹, LI Guifang², LI Ping¹

(1. Tianshui Soil and Water Conservation Experimental Station, Tianshui, Gansu 741000; 2. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005)

Abstract: The objective of this study was to understand the influence of precipitation and land use change on water and sediment yield in Luoyugou watershed in the loess hilly gully region, which based on the annual precipitation data, runoff and sediment yield data and land use change data collected from 1986 to 2010. The results indicated that during 1986 to 2010, the annual precipitation and precipitation of flood season were basically stable, and there was no obvious increase or decrease trend, while the annual runoff and annual sediment discharge in Luoyugou watershed were fluctuating and decreasing during this period. The precipitation and runoff correlation analysis showed that the runoff and sediment yield in the flood season had the greatest significant influence on the annual runoff and annual sediment discharge in the watershed. Through analyzing the change of water and sediment in different periods, we found that the change of land use mode, mainly the change of soil and water conservation measures such as terraced fields and forest grass, had limited effect on water reduction and sediment reduction in the watershed. The increase in the area of terraced fields and forest grass did not significantly change the relationship of water and sediment in the watershed, and the engineering measures such as silt dams played important role in reducing the water and sediment in the hilly and gully region of the Loess Plateau. The results could provide some theoretical basis for soil erosion management and dispose of soil and water conservation measures in loess hilly and gully region.

Keywords: precipitation; land use change; runoff and sediment; Luoyugou watershed

流域水沙关系是流域降水与下垫面相互作用的结果, 是一个复杂的物理过程^[1]。降水量是影响径流形成的重要因素^[2], 降水和径流二者时空特征的改变, 势必造成流域水沙关系的变化^[3-5]。莫莉等^[6]在

分析北洛河近 50 年的水沙变化特征中认为, 降水是影响径流输沙变化的主要自然因素。卫伟等^[7]指出影响径流量最重要的降水特征值是降水量、最大 30 min 雨强及二者之积。降水量的多少直接影响径流

量,但从降水量多少来判断是否产生侵蚀或者产生多少侵蚀是不可靠的。刘昌明等^[8]分析了 1956—2000 年黄河干流径流量的主要影响因素,发现降雨变化对黄河上游径流量减少的影响占 75%,人类活动等其他因素的影响占 25%。

土地利用一方面影响流域的蒸散发性能,另一方面通过地表覆被类型及程度的改变而显著影响地表径流的产生,进而影响流域径流量及输沙量^[9]。李建柱等^[10]对海河大清河流域研究表明,除降雨因素外,流域土地利用变化也是导致流域洪水量级减小的主要因素。秦富仓等^[11]研究认为,坡面草本植物能够增大水流底层的阻力,减小床面的切应力,枯枝落叶层通过减小径流流速,从而降低径流挟沙能力。不同土地利用中,农田最容易产生径流,牧草次之,灌丛产生的径流量最小。郝芳华等^[12]研究指出,森林的存在增加了径流量,减少了产沙量;草地也能减少产沙量;农业用地的增加将会增加产沙量。受干扰最严重的农田和人工草地产生较为严重的水土流失,灌丛和荒草地的保水保土效果最佳,多年生针叶林由于其地表凋落物的累积和对林下土壤性状的改善,能够较好的控制径流侵蚀,具备较强的水土保持能力^[7]。

黄土高原是我国生态环境建设的重点地区,近几年大量水土保持措施的实施,在很大程度上改变了区域的土地利用方式,也改变了区域的水循环和河道的冲淤过程^[13]。然而,对于各种水保措施的组合减水减沙机制这一问题,即植被覆盖、水土保持措施的实施,改变了土地利用的方式,使得流域的产水产沙发生改变,多数研究者认为,增加植被覆盖能减少地表径流和产沙,但是对于地表径流量和产沙量之间的关系是否发生改变研究较少。郑明国等^[14-15]对黄土高原羊道沟和插财主沟的研究表明,增加植被覆盖不会改变流域的水沙关系。郝芳华等^[12]对黄河下游支流洛河上游流域研究指出,平水年土地利用变化对产流量影响最小,降雨量的增大能弱化下垫面对产流量的影响。胡彩虹等^[16]对汾河流域的研究指出,土地利用变化对径流的影响受降雨条件影响,降雨量越大,土地利用变化对径流减少越明显。

黄土高原丘陵沟壑区严重的土壤侵蚀,不仅制约当地社会经济发展,同时给黄河下游地区带来一系列生态安全问题。20 世纪 40 年代初,黄委会在黄土高原丘陵沟壑第三副区建立了我国最早的水土保持科学试验站——天水水土保持科学试验站(以下简称天水站),开始了该区域水土流失规律观测试验研究,取得了丰富的观测资料。位于甘肃省天水市的罗玉沟流域,是黄土高原丘陵沟壑区典型流域,也是我国水

土流失最严重的地区之一,研究降水和土地利用方式变化对罗玉沟流域水沙关系的影响具有较好的代表性。因此,本研究以罗玉沟流域为研究对象,以 1986—2010 年实测流域降水、径流泥沙资料及典型年份土地利用数据为基础,探究降水、土地利用变化对流域水沙关系的影响,以期能加深认识黄土高原丘陵沟壑区流域水沙关系对降水和土地利用变化的响应,为黄土高原特定区域生态环境恢复及水土保持措施布设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

罗玉沟流域位于甘肃省天水市,流域面积 72.79 km²,地理坐标 105°30′—105°45′ E, 34°34′—34°40′ N,呈狭长形,羽毛状沟系,平均宽度 3.37 km,主沟长 21.81 km(图 1)。流域主要土壤类型为山地灰褐土,其分布占全流域 91.7%。流域坡度组成复杂,≤5°、5°~10°、10°~15°、15°~25°、>25°的坡面分别占流域面积的 7.2%,13.1%,28.1%,28.0%,23.6%。流域内有大小支沟 138 条,沟壑密度为 3.54 km/km²,流域沟坡面积比值为 0.153,属于典型的黄土丘陵沟壑区。

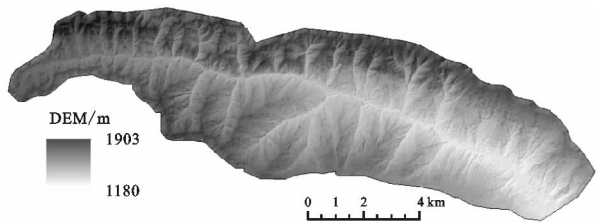


图 1 罗玉沟流域示意

罗玉沟流域多年平均降水量为 554.2 mm (1986—2016 年),其中 6—9 月降水占 60%以上,雨热同期。年蒸发量 1 293.3 mm,干燥度为 1.3。年平均气温 10.7℃,≥10℃活动积温 3 360℃,无霜期 184 d。流域农耕地约占流域总面积的 55.0%,主要农作物有小麦、玉米、洋芋等。流域内乔木均为人工植被,灌木全部为天然生长。经济林以樱桃、苹果、杏、梨、核桃为主,近年来经济林发展较快。

1.2 数据获取与处理

研究所用水文数据主要包括罗玉沟流域 1986—2010 年降水、径流和输沙量资料,其中降水原始数据来源于天水站在该流域先后布设的 26 个雨量站(图 2),径流、泥沙原始资料采用天水站设于左家场把口站的实测值。水文资料数值取用精度与误差值均按《水文资料整编规范》(SL 247—2012)结合《水土保持径流泥沙测验及资料整编须知》(试行稿)中的要求处理。土地利用资料采用韩洁春^[17]的研究结果,包括 1986,1995,2001,2008 年 4 个典型年份罗玉沟流域

不同土地利用类型及面积数据。

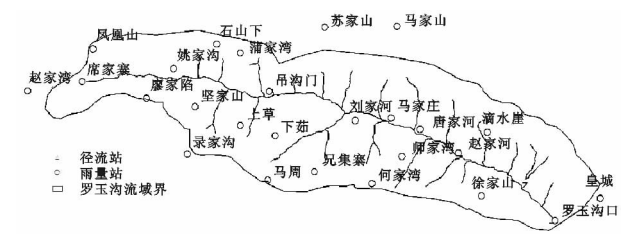


图 2 罗玉沟流域径流站、雨量站分布

通过 Excel 软件对流域水文原始资料进一步整理,同时利用 SPSS 24.0 软件进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 罗玉沟流域降水特征分析

2.1.1 罗玉沟流域多年平均月降水特征 由图 3 可知,罗玉沟流域 1986—2010 年降水主要集中在 5—10 月,占全年降水的 82.4%,其中 7,8 月平均降水量为 90.7,90.9 mm,占全年降水量的 16.4%和 16.5%。表明罗玉沟流域降水分布季节性较为明显。基于此,本文选取年降水量和汛期降水量(5—10 月)指标来探究降水对罗玉沟流域水沙关系的影响。

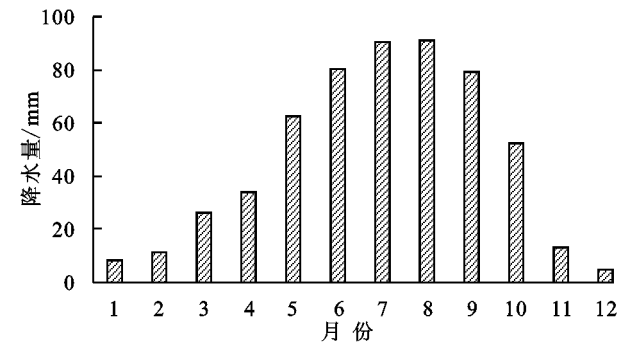


图 3 罗玉沟流域 1986—2010 年多年平均月降水量

2.1.2 罗玉沟流域年降水量和汛期降水量变化特征

由图 4 可知,流域 1986—2010 年降水量年际间存在一定波动,其中 1990,2003,2007 年属于丰水年,1986,1994—1997,2010 年降水量相对偏少。同时,通过对比 1986—2010 年罗玉沟流域年降水量和汛期

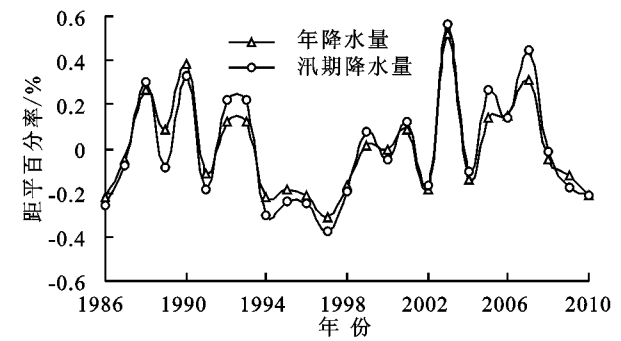


图 5 罗玉沟流域 1986—2010 年年降水量、汛期降水量距平及累积距平变化

2.2 罗玉沟流域径流输沙特征变化及其与降水关系

2.2.1 罗玉沟流域年径流量和年输沙量特征 由图

降水量可知,二者的变化趋势基本一致,其平均值仅相差 97 mm 左右(年降水量平均值为 552.5 mm,标准差为 115.9 mm;汛期降水量平均值为 455.1 mm,标准差为 113.0 mm),汛期降水量占年降水量的 80%以上,二者表现出极显著的相关关系($r = 0.966$)。表明该流域绝大部分降水主要发生在汛期,汛期是影响全年降水的关键时期。

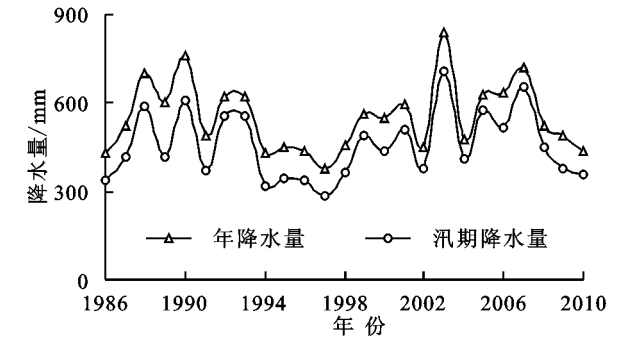
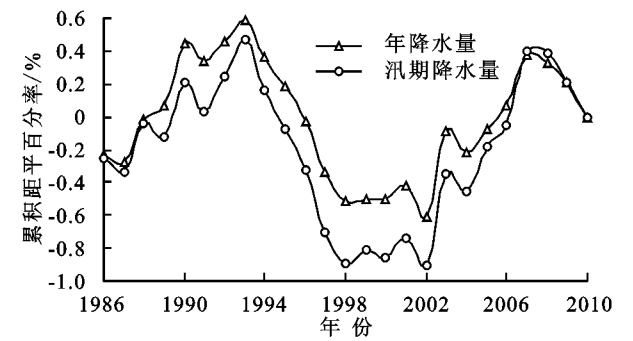


图 4 罗玉沟流域 1986—2010 年年降水量及汛期降水量年际变化

由图 5 可知,研究区 1986—2010 年年降水量和汛期降水量年际间变化较大。除 1993—1999 年年降水量和汛期降水量距平呈现负值外,其余年限年降水量和汛期降水量距平基本呈现为正负交替出现。表明罗玉沟流域年降水量和汛期降水量较多年平均水平增减交替出现,无明显的旱涝趋势。此外,汛期降水量的年际距平变化稍大于年降水量距平,表明汛期降水量的年际差异更大。1990—1994 年,流域年降水量和汛期降水量累积距平均为正值,表示该时期内罗玉沟流域年降水量和汛期降水量总体高于多年平均水平;1993—2002 年二者的累积距平不断降低,尤其是汛期降水量降低更为明显,说明此时段内年降水量和汛期降水量均较平均水平有一定程度的减少;2002—2007 年此时段内累积距平逐渐上升,表明年降水量又有了一定程度的增加。总体而言,1986—2010 年罗玉沟流域年降水量和汛期降水量虽然存在一定波动,但基本保持平稳,无明显的增减趋势。



6 可知,研究区 1986—2010 年期间年径流量和年输沙量存在较为明显的年际波动,变化范围为 13.6~

$682.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 和 $0.6 \sim 162.4 \times 10^4 \text{ t}$ 。

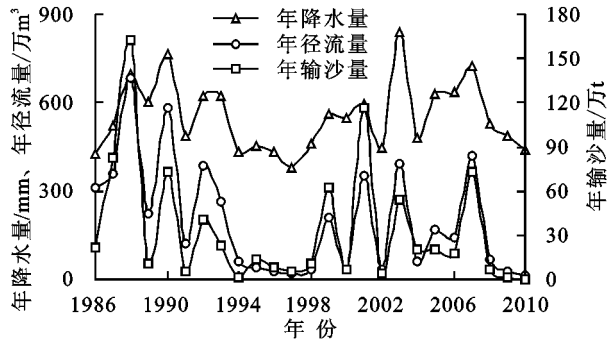


图 6 罗玉沟流域 1986—2010 年年降水量、年径流量和年输沙量动态变化

由图 7 可知,1986—2010 年年径流量和年输沙量年际变化趋势类似,年际变化较大。除 1994—2000 年年径流量和年输沙量距平均呈现负值外,其余年限年径流量和年输沙量距平基本呈现为正负交替出现,且正距

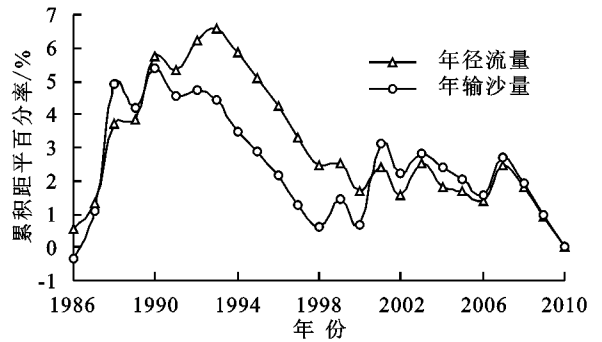
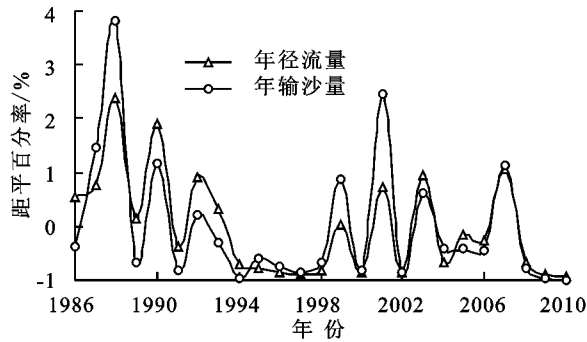


图 7 罗玉沟流域 1986—2010 年年径流量、年输沙量距平和累积距平变化

2.2.2 降水对罗玉沟流域水沙关系变化的影响 通过对 1986—2010 年流域年降水量、汛期降水量、年径流量、年输沙量、汛期径流量以及汛期输沙量进行独立样本检验分析可知,不同年份间各参数相对独立。由流域年降水量、汛期降水量以及年径流量变化情况(图 4 和图 6)发现,三者变化趋势基本一致。通过相

平绝对量大于负距平绝对量,可以判定流域年径流量和年输沙量存在较为明显的年际波动。此外,对比年径流量和年输沙量的距平图可知,年输沙量的年际波动变化大于年径流量,表明输沙量变化对侵蚀环境变化较径流量更加敏感^[18]。

由 1986—2010 年累积距平变化趋势可知,流域年径流量和年输沙量变化大致经历了 3 个时期:1986—1993 年,二者的累积距平均逐渐增加,表明此时期年径流量和年输沙量较多年平均值呈增加趋势;1994—2000 年,该阶段累积距平逐年降低,表明这一时期年径流量和年输沙量呈减少趋势;2001—2010 年,该阶段累积距平整体呈现为波动降低,表明这一时期年径流量和年输沙量波动变化,但整体趋于减少。综上所述,我们可以推断,罗玉沟流域在 1986—2010 年期间,年径流量和年输沙量在总量上呈一定的递减趋势。

关分析(表 1)可知,年降水量与年径流量表现出较好的极显著正相关关系($r=0.765$);年径流量与汛期径流量的相关性最好,相关系数高达 0.965,表现为极显著正相关关系。年输沙量与汛期输沙量的关系最为密切,其次为汛期径流量。研究表明,汛期产流产沙量对流域全年径流量和输沙量具有重要影响。

表 1 罗玉沟流域 1986—2010 年水文要素相关分析

指 标	年降水量	汛期降水量	年径流量	年输沙量	汛期径流量	汛期输沙量
年降水量	1					
汛期降水量	0.966**	1				
年径流量	0.765**	0.739**	1			
年输沙量	0.590**	0.601**	0.857**	1		
汛期径流量	0.831**	0.829**	0.965**	0.871**	1	
汛期输沙量	0.618**	0.637**	0.834**	0.968**	0.895**	1

注: $n=25$; ** $p<0.01$; 年降水量、汛期降水量单位为 mm; 年径流量、汛期径流量单位为 10^4 m^3 ; 年输沙量、汛期输沙量单位为 10^4 t 。

由流域 1986—2010 年多年降水特征分析可知(图 5),25 年间流域年降水量和汛期降水量基本保持平稳,无明显的增减趋势,但对流域水沙变化特征分析可知(图 7),研究区年径流量和年输沙量在总量上表现为减少趋势。说明虽然降水是导致罗玉沟流域产流产沙变化的主要原因,但流域水沙关系变化还受到其他因素的影响。

2.3 土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系变化的影响

土地利用类型是影响径流侵蚀的一个极其关键的因素^[7],土地利用方式的改变会影响流域径流量及输沙量^[9,12]。罗玉沟流域年径流量和年输沙量峰值均发生在 1986—1992 年间,而 1993—1998 年流域年径流量和年输沙量维持在较低水平,除该时期降水量较低外,另一个主要原因可能是与 1986—1992

年相比,1993—1998 年流域土地利用方式发生了较大改变。由罗玉沟流域 1986—2010 年土地利用面积变化(表 2)可知,虽然 1995 年流域内耕地面积与 1986 年基本持平,但是 1995 年坡耕地面积比 1986 年减少了 77.19%,梯田面积则增加了 11.64 倍,林地面积也增加了 26.36%。梯田和林地的增加可以有效提高流域涵养水源的能力,使得流域年径流量维持在较低水平,同时梯田和林地也可以在一定程度上减少耕地和林地的水土流失量,使得流域年输

沙量迅速降低。

2000—2010 年期间,流域年径流量和年输沙量呈现为波动减少趋势,整体差异不大。主要表现为 2000 年以后,流域内土地利用方式基本变化不大,梯田面积基本维持不变,坡耕地面积稍有减少,因而降水因素仍是影响此时期流域水沙变化的主要因素。

整体而言,1986—2010 年罗玉沟流域土地利用变化主要表现在梯田面积增加,坡耕地面积减少,林地(包括果园)和草地面积增加。

表 2 罗玉沟流域 1986—2010 年土地利用面积变化

土地利用 类型	1986 年		1995 年		2001 年		2008 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
坡耕地	49.23	67.63	11.23	15.43	11.18	15.36	9.49	13.04
梯田	3.09	4.25	39.05	53.65	39.03	53.62	39.76	54.62
水域	1.06	1.46	1.06	1.46	1.06	1.46	0.84	1.15
果园	2.07	2.84	2.17	2.98	2.18	2.99	4.27	5.87
林地	7.89	10.84	9.97	13.70	10.06	13.82	10.13	13.92
村庄	2.69	3.70	2.68	3.68	2.69	3.70	3.25	4.46
草地	6.76	9.29	6.63	9.11	6.59	9.05	5.05	6.94

备注:数据来源于韩洁春^[17]。

罗玉沟流域大规模水土流失治理自上世纪 80 年代中期开始,对研究区土地利用变化产生较大影响;而 1999—2010 年间,由于黄河水土保持生态工程藉河示范区项目以及坡改梯、整村推进等梯田建设项目的实施,使得流域内坡耕地再次迅速减少,梯田化水平显著提高。基于此,为进一步探究土地利用变化对流域产流产沙的影响,根据流域 1986—2010 年土地利用变化,将流域降水和水沙数据分为 1986—1999 年和 2000—2010 年两个时期进行分析。由图 8 可知,流域后期总体较前期径流量减少,即坡耕地面积较少,梯田、林草地面积较多的土地利用条件下年径流量显著减少。岳本江^[18]研究指出,林草地的增加可以改变流域水文循环状况和水资源的再分配,进而对流域径流量的增减产生影响。

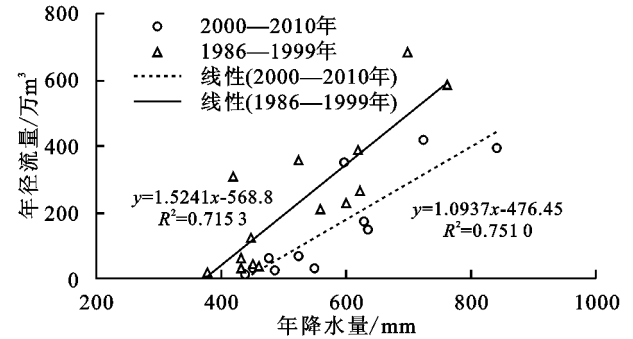


图 8 不同时期罗玉沟流域年降水量与年径流量关系

对不同时期罗玉沟流域水沙关系分析可知(图 9),1986—1999 年和 2000—2010 年两个时期流域水沙关系基本接近,表明对罗玉沟流域而言,土地利用方式的变化对流域水沙关系没有明显影响。与

1986—1999 年相比,2000—2010 年流域年输沙量随年径流量增加的增幅反而更大一些,说明土地利用方式的改变,尤其是梯田、林草地等面积增加在降低年径流量的同时,并未显著降低年输沙量。可能是对于黄土高原地区,高强度大暴雨是导致流域产流产沙的主要原因。安乐平等^[19]对罗玉沟流域典型洪水输沙资料统计分析发现,一次洪水输沙量可占流域年输沙量的 60%以上。姚文艺等^[20]对黄土高原多沙粗沙区皇甫川流域研究指出,梯田、林草等治理措施仅在流域降水量较低情况下才起作用。此外,王盛萍等^[21]研究指出,土地利用变化对径流的影响受植被生长季的影响较为明显,其影响程度同时受到气候条件以及流域土壤及地形条件等影响,其中降水仍是影响流域径流的主要因素。原翠萍等^[22]对罗玉沟流域内的桥子东沟和桥子西沟小流域研究指出,水土保持综合治理措施实施后的小流域径流量大幅减少,单纯减沙的效果不大,主要是通过减水进而减沙。郑明国等^[14]对晋西离石试验站的观测结果表明,对于黄土丘陵区植被措施难以改变沟道的输沙能力和黄土丘陵区流域泥沙来源充沛的特点,认为植被措施不会改变流域水沙关系,植被的减沙效应仅通过减水来实现。对于大流域水沙关系主要取决于沟道或者河道的特性,因此认为流域尺度越大,植被越难以改变其水沙关系。进而指出,对于黄土丘陵区土地利用方式改变主要是影响流域年径流量的变化。本文的研究结果也表明,对于黄土高原丘陵沟壑区,梯田、林草等水土保持措施仅在一定程度上减少流域径流量和输沙量,但并未

明显影响水沙关系。

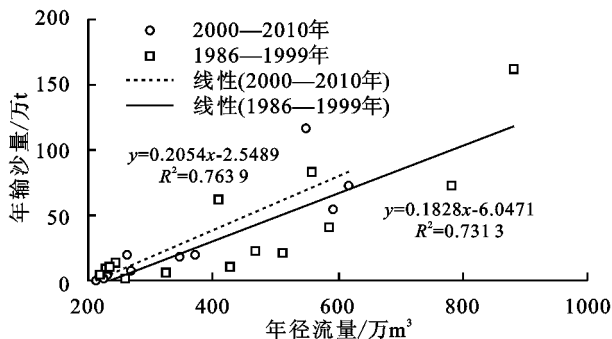


图 9 不同时期罗玉沟流域水沙关系

此外,2001 年流域年径流量和输沙量分别是 2006 年的 2.4、6.4 倍,但 2006 年的降水量却比 2001 年增加了 6.2%,对比 2001 年和 2006 年土地利用类型及面积变化可知,2001 年和 2006 年罗玉沟流域土地利用方式面积差异不大。两个时期流域径流泥沙量变化差异较大的主要原因可能是与 2001 年相比,2004—2006 年期间罗玉沟流域修建了水窖 50 个,并新采取了一系列沟道治理工程(21 座)。表明对于罗玉沟流域水土流失治理,淤地坝等工程措施对于减少流域水土流失起到至关重要的作用,这与徐学选等^[23]对典型黄土丘陵沟壑区燕沟流域以及夏露等^[24]对黄土丘陵沟壑区砚瓦川流域的研究结果一致。因此,对于黄土丘陵沟壑区水土流失治理应该生物措施与工程措施并重,从而达到控制水土流失的目的。

傅伯杰等^[25]指出,土地利用对土壤和地形等模型参数的影响是非常复杂的,除考虑土地利用类型之间的差异外,还要进一步研究土地利用时空变异的影响,会有助于深入地揭示土地利用变化与水土流失的内在关系。本文在分析降水和土地利用方式对罗玉沟流域水沙关系的影响中,仅仅从降水和土地利用方式对水沙关系的影响进行了定性分析,并未对其各自的贡献进行探讨;其次土地利用方式的改变,尤其是水土保持措施配置比对流域水沙变化具有重要影响^[20],在以后的研究中需要进一步加强此方面的研究。

3 结论

(1)1986—2010 年罗玉沟流域年降水量和汛期降水量虽然存在一定波动,但基本保持平稳,无明显的增减趋势。

(2)罗玉沟流域在 1986—2010 年期间,年径流量和年输沙量总体呈减少趋势,汛期产流产沙对流域年径流量和输沙量影响最大。

(3)土地利用方式,即梯田、林草等水土保持措施变化,在一定程度上降低流域年径流量,但对不同时期流域水沙关系无明显影响。

(4)沟道治理等工程措施对于减少罗玉沟流域水土流失起重要作用;黄土丘陵沟壑区水土流失治理应该生物措施与工程措施并重,从而达到控制水土流失的目的。

参考文献:

- [1] 蔡强国,刘纪根,刘前进. 岔巴沟流域次暴雨产沙统计模型[J]. 地理研究,2004,23(4):433-439.
- [2] 刘昌明,钟骏襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析[J]. 地理学报,1978,33(2):112-127.
- [3] 吕振豫. 黄河上游区人类活动和气候变化对水沙过程的影响研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院,2017.
- [4] 付金霞. 小理河流域径流泥沙对气候和土地利用变化的响应研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [5] 柴雪柯. 渭河流域水沙变化及其影响因素[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [6] 莫莉,穆兴民,王勇,等. 近 50 多年来北洛河水沙变化特征及原因分析[J]. 泥沙研究,2009(6):30-36.
- [7] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报,2006,26(11):3847-3853.
- [8] 刘昌明,张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析[J]. 地理学报,2004,59(3):323-330.
- [9] 刘淑燕,余新晓,信忠保,等. 黄土丘陵沟壑区典型流域土地利用变化对水沙关系的影响[J]. 地理科学进展,2010,29(5):565-571.
- [10] 李建柱,冯平. 降雨因素对大清河流域洪水径流变化影响分析[J]. 水利学报,2010,41(5):595-600,607.
- [11] 秦富仓,余新晓,张满良,等. 小流域林草植被控制土壤侵蚀机理研究[J]. 应用生态学报,2005,16(9):1618-1622.
- [12] 郝芳华,陈利群,刘昌明,等. 土地利用变化对产流和产沙的影响分析[J]. 水土保持学报,2004,18(3):5-8.
- [13] Hang X M, Cao W H, Guo Q C, et al. Effects of land-use 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.
- [14] 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.
- [15] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等. 黄土丘陵沟壑区坡面水土保持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.
- [16] 胡彩虹,高申,吴泽宁,等. 土地利用变化对汾河流域典型区域径流影响模拟研究[J]. 人民珠江,2017,38(8):25-28.
- [17] 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.

- Geomorphology, 2015, 248: 264-272.
- [5] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2014, 116: 51-59.
- [6] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al. Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills [J]. Transactions of the Asae, 2002, 45(6): 1897-1903.
- [7] Nachtergaele J, Poesen J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion [J]. European Journal of Soil Science, 2002, 53(3): 449-463.
- [8] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow [J]. Transactions of the Asae American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45(2): 351-357.
- [9] Simon A, Collison A J C. Pore-water pressure effects on the detachment of cohesive streambeds: Seepage forces and matric suction [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 26(13): 1421-1442.
- [10] Fox G A, Chuagor M L, Wilson G V. Erosion of noncohesive sediment by ground water seepage: Lysimeter experiments and stability modeling [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6): 1822-1830.
- [11] 张光辉, 刘宝元, 何小武, 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48-52.
- [12] 柳玉梅, 张光辉, 韩艳峰. 坡面流土壤分离速率与输沙率耦合关系研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 24-28.
- [13] Geng R, Zhang G H, Ma Q H, et al. Soil resistance to runoff on steep croplands in Eastern China [J]. Catena, 2017, 152: 18-28.
- [14] Defersha M B, Quraishi S, Melesse A. The effect of slope steepness and antecedent moisture content on interrill erosion, runoff and sediment size distribution in the highlands of Ethiopia [J]. Hydrology and Earth System Sciences and Discussions, 2011, 15(7): 2367-2375.
- [15] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds [J]. Geoderma, 2016, 262: 165-173.
- [16] Vermang J, Demeyer V, Cornelis W M, et al. Aggregate stability and erosion response to antecedent water content of a loess soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(3): 718-726.
- [17] Govers G, Everaert W, Poesen J, et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(4): 313-328.
- [18] Kemper W D, Rosenau R C, Dexter A R. Cohesion development in disrupted soils as affected by clay and organic matter content and temperature [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(4): 860-866.
- [19] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 882-886.
- [20] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 坡面冲刷过程中红壤分离速率定量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 96-100.
- [22] 原翠萍, 雷廷武, 张满良, 等. 黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 36-43.
- [23] 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.
- [24] 夏露, 宋孝玉, 李怀有, 等. 砚瓦川流域水沙演变特征及其驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 89-95.
- [25] 傅伯杰, 邱扬, 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.

(上接第 34 页)

- [18] 岳本江. 延河流域水沙演变及对土地利用/覆被变化的响应[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2015.
- [19] 安乐平, 秦瑞杰, 康廷祥, 等. 黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域水沙特性分析[J]. 中国水土保持, 2014(12): 36-39, 69.
- [20] 姚文艺, 茹玉英, 康玲玲. 水土保持措施不同配置体系的滞洪减沙效应[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 28-31.
- [21] 王盛萍, 张志强, 孙阁, 等. 黄土高原流域土地利用变化水文动态响应: 以甘肃天水吕二沟流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 48-54.