

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.013.

秦瑞杰, 李平, 肖培青, 等. 罗玉沟流域水沙变化趋势及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 151-158.

Qin Ruijie, Li Ping, Xiao Peiqing, et al. Trends of Runoff and Sediment and Their Impact Factors in Luoyugou Watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 151-158.

# 罗玉沟流域水沙变化趋势及影响因素

秦瑞杰<sup>1</sup>, 李平<sup>1</sup>, 肖培青<sup>2</sup>, 马田铂<sup>1</sup>, 王柯凡<sup>1</sup>

(1. 黄河水利委员会天水水土保持科学试验站, 甘肃 天水 741000;  
2. 黄河水利科学研究院, 水利部黄土高原水土保持重点实验室, 郑州 450003)

**摘要:** [目的] 探讨小流域水沙变化趋势及影响因素, 为黄土高原丘陵沟壑区水土流失治理和水土保持措施布设提供参考依据。[方法] 采取 Spearman 秩次相关检验方法、累积距平法和双累积曲线法等对黄土丘陵沟壑区罗玉沟流域 1986—2016 年降水量、径流量和输沙量变化趋势和演变过程进行分析。[结果] (1) 1986—2016 年罗玉沟流域年降水量趋势性变化不显著; 流域年径流量和年输沙量变化具有明显的阶段性, 以 1993 年为界, 年径流量和年输沙量呈显著降低趋势。 (2) 降水和水土保持措施影响罗玉沟流域年径流量和输沙量, 不同降水水平年, 降水和水土保持措施对流域水沙变化的影响不同, 水土保持措施使流域枯水年份径流量和输沙量减少最为显著。 (3) 水土保持措施对年径流量和年输沙量的减少贡献率分别为 83.50% 和 80.97%。[结论] 降水量变化不显著的情况下, 水土保持措施对罗玉沟流域年径流量和年输沙量的减少起主导作用, 水土保持综合治理对枯水年径流量和输沙量的影响幅度最大。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 罗玉沟流域; 水沙变化; 影响因素

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0151-08

## Trends of Runoff and Sediment and Their Impact Factors in Luoyugou Watershed

Qin Ruijie<sup>1</sup>, Li Ping<sup>1</sup>, Xiao Peiqing<sup>2</sup>, Ma Tianbo<sup>1</sup>, Wang Kefan<sup>1</sup>

(1. Tianshui Experimental Station on Soil and Water Conservation, YRCC, Tianshui, Gansu 741000, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau, Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore trends and influencing factors of water and sediment changes in small watersheds, and to provide reference basis for soil erosion control and soil conservation measures in loess hilly and gully region. [Methods] The Spearman rank correlation test, cumulative anomaly, and double cumulative curve method were used to analyze the trend and evolution process of precipitation, runoff, and sediment transport in Luoyugou watershed of loess hilly and gully region from 1986 to 2016. [Results] (1) The trend change of annual precipitation was not significant in Luoyugou basin from 1986 to 2016. The changes in annual runoff and sediment transport in the watershed had obvious stages, with the year 1993 as the boundary, and the annual runoff and sediment transport showed a significant downward trend. (2) Precipitation and soil and water conservation measures affected the annual runoff and sediment transport in Luoyugou watershed, and their influence on the changes of water and sediment varied with different precipitation levels. Soil and water conservation measures reduced the runoff and sediment transport in dry years of the watershed significantly. (3) The contribution rates of soil and water conservation measures

收稿日期: 2022-11-23

修回日期: 2022-12-14

资助项目: 国家自然科学基金黄河水科学联合基金(U2243210); 黄河流域水土保持(12616201453102); 黄委优秀青年人才科技项目(HQK-202303)

第一作者: 秦瑞杰(1985—), 女, 内蒙赤峰人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水土保持。E-mail: hwtsqrj@163.com

通信作者: 肖培青(1972—), 女, 河南卫辉人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: peixingxiao@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

to the reduction of annual runoff and annual sediment transport were 83.50% and 80.97%, respectively. [Conclusion] In the absence of significant changes in precipitation, soil and water conservation measures play a leading role in reducing the annual runoff and sediment transport in Luoyugou watershed. The comprehensive management of soil and water conservation has the greatest impact on the runoff and sediment transport in dry year.

**Keywords:** loess hilly and gully region; Luoyugou watershed; trends of streamflow and sediment; impact factors

流域水沙关系是反映流域径流量和输沙量关系的指标,受多种因素的影响<sup>[1-3]</sup>。近年来,气候变化和人类活动的加剧,对流域径流量和输沙量均产生显著影响<sup>[1,2,4-7]</sup>。孙倩等<sup>[8]</sup>对黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及主控因素进行研究指出,不同流域径流输沙的变化均主要是由人类活动影响造成的。郭爱军等<sup>[9]</sup>对泾河流域降雨—径流关系研究指出,与1960—1996年相比,1997—2010年人类活动和气候变化对流域径流减少贡献率分别为80.96%和19.04%。而王随继等<sup>[10]</sup>通过分析皇甫川流域径流量和降水量的变化趋势及影响因素,指出不同时期降雨和人类活动对流域径流量减少的贡献率分别为36.43%,16.81%和63.57%,83.19%。孙兆峰等<sup>[11]</sup>对秃尾河流域径流衰减驱动因子分析研究指出,在径流衰减驱动因子中,人类活动和气候因子的权重分别为71.1%和28.9%。研究表明,研究区域不同,人类活动和气候对流域水沙变化的影响程度存在明显不同。

黄土高原是中国生态环境最为脆弱的区域之一,而黄土高原丘陵沟壑区是黄河泥沙的主要来源,是黄土高原水土流失最严重的地区<sup>[12]</sup>。20世纪80年代开始,黄土高原地区开展了以流域为单元的综合治理与开发,20世纪90年代末实施了一系列退耕还林还草的生态恢复工程<sup>[13]</sup>,这些水土保持措施的实施,使得黄土高原土地利用格局发生了较大变化,改变了流域下垫面条件,进而对流域的水沙关系产生深远影响<sup>[14-16]</sup>。对于黄土高原地区,气候因子中降水因子以及人类活动导致的土地利用变化是影响流域水沙变化最重要的因素,近年来成为黄土高原地区研究的热点话题<sup>[1,3,7,8,10,17]</sup>。基于此,本文以黄土高原丘陵沟壑区典型流域—罗玉沟流域为研究对象,基于1986—2016年实测流域降水和水沙资料,通过Spearman秩次相关检验方法和累积双曲线法,分析31年来流域降水和水沙变化趋势,探讨流域水沙演变的驱动因素,明晰流域径流泥沙演变规律及其影响因素。研究结果可为黄土高原丘陵沟壑区小流域水土流失治理和水土保持措施布置提供科学依据。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

罗玉沟流域位于甘肃省天水市北郊,是渭河支流藉河左岸的一级支沟。地理位置位于105°30′—105°45′E,34°34′—34°40′N,沟口测流断面以上控制面积72.79 km<sup>2</sup>,流域呈狭长形,羽毛状沟系,平均宽度3.37 km,主沟长21.81 km,平均比降3.35%。流域按土壤、地貌特征划分为黄土区、杂土区和土石山区3个类型区,主要土壤类型为山地灰褐土,占全流域91.7%。流域内有大小支沟138条,沟壑密度为3.54 km/km<sup>2</sup>,属于典型的黄土丘陵沟壑区。该流域于1983年被列为黄河水利委员会水土保持试点小流域、甘肃省重点综合治理小流域,1985年设站开始降水、径流和泥沙观测。

罗玉沟流域属大陆性季风气候,降水年内季节分配不均,冬春季干旱少雨,夏秋季降雨丰富,多年平均降水量为550.6 mm,其中6—9月份降水占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。流域近年来经济林发展很快,以樱桃、苹果、梨等为主。

### 1.2 数据处理及研究方法

本文涉及的水文资料主要包括1986—2016年降水、径流和输沙量观测数据,其中降水资料来源于黄河水利委员会天水水土保持科学试验站(以下简称天水站)在罗玉沟流域先后布设的31个雨量站,径流、泥沙数据来源于天水站布设的罗玉沟流域径流站实测径流泥沙观测成果,水土保持措施数据主要来源于天水站历年调查统计结果。研究方法主要包括Spearman秩次相关检验方法<sup>[18-19]</sup>,累积距平法和累积量斜率变化率比较法<sup>[8,10,20]</sup>。

本文采取累积量斜率变化率比较法计算降水和水土保持措施对罗玉沟流域径流和输沙的贡献率,通过年降水量—年径流量和年降水量—年输沙量的双累积曲线进行分析计算<sup>[8,10,20]</sup>。利用SPSS 24.0中的描述统计、相关分析、回归分析以及方差分析等统计方法进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 流域年降水量、径流量和输沙量的变化特征

2.1.1 不同时期流域各水文参数变化分析 1986—2016 年罗玉沟流域不同时期年降水量、径流量和输沙量特征值见表 1。由表可知,近 31 年罗玉沟流域多年平均降水量为 550.6 mm,不同时期流域年均降水量表现为降低—升高—降低趋势,其中 2000—2010 年年降水量均值比 1990—1999 年增加了 12.0%。不同时期年降水量的变异系数接近,1990—1999 年年降水量的极值比最大,最大年降水量与最小年降水量相差一倍。

与年降水量相比,不同时期流域年径流量变化趋

表 1 不同时期罗玉沟流域年均降水量、径流量和输沙量变化特征

时期	年降水量			年径流量			年输沙量		
	平均/mm	变异系数	极值比	平均/万 m <sup>3</sup>	变异系数	极值比	平均/万 t	变异系数	极值比
1986—1989	561.0	0.25	1.7	393.9	0.51	3.0	69.5	1.00	15.0
1990—1999	514.8	0.24	2.1	175.0	1.07	31.3	24.5	1.05	44.2
2000—2010	576.4	0.23	1.9	167.6	0.94	30.7	29.3	1.26	196.9
2011—2016	560.9	0.21	1.6	160.5	1.27	28.4	15.7	1.62	114.5
多年平均	550.6	0.22	2.3	193.4	0.98	50.28	30.3	1.28	280.0

2.1.2 流域年降水量、年径流量及年输沙量变化趋势分析 利用 Spearman 秩次相关检验方法<sup>[18-19]</sup>对 1986—2016 年罗玉沟流域年降水量、径流量和输沙量进行统计分析,得到不同水文特征值与年份的秩相关系数(表 2)。由表 2 可知,随着时间的推移,年降

表 2 罗玉沟流域 1986—2016 年年降水量、径流量和输沙量变化趋势检验

Table 2 Change trend test of annual precipitation, runoff and sediment during 1986—2016

检验方法	年降水量		年径流量		年输沙量	
	检验统计量	显著水平	检验统计量	显著水平	检验统计量	显著水平
Spearman	0.031	—	−0.407	*	−0.435	*

注:—表示不显著,\*表示  $p<0.05$  水平显著。

2.2 流域水文参数突变及水沙变化驱动力因素分析

2.2.1 流域突变年份分析 根据 1986—2016 年流域降水量累积距平的年际变化可知(图 1),降水量累积距平变化表现为上升—下降—上升的变化趋势。31 年间年降水量有两个突变年份,分别是 1993 年和 2002 年。2002 年以后年降水量累积距平呈波动上升趋势。与年降水量变化趋势不同,流域年径流量变化的突变年份只有一个,为 1993 年,与降水量的第一个突变点一致。1993 年以后,年径流量累积距平呈现波动下降趋势。流域年输沙量的累积距平值变化较大,1986—2016 年呈上升—下降的波动变化趋势。

势存在明显差异。不同时期流域年径流量呈逐渐降低趋势,1986—1989 年年径流量是 2011—2016 年年均径流量的 2.5 倍。不同时期年径流量变异系数和极值比总体呈增大趋势,表明不同时期流域年径流量的年际波动性较强,年际间存在较大差异。

不同时期流域年输沙量的变化趋势与年降水量基本一致,但与年径流量变化趋势存在不同。1986—1989 年流域年输沙量分别是 1990—1999 年、2000—2010 年和 2011—2016 年的 2.8,2.4,4.4 倍。不同时期流域年输沙量的变异系数均不小于 1,2011—2016 年变异系数高达 1.62,且年际间极值比差异也较大,表明年输沙量的年际差异较大,变化较为剧烈,其波动性大于年降水量和年径流量。

水量的检验统计量未达到显著性水平,说明 1986—2016 年流域年降水量随时间变化无显著增减趋势。年径流量和年输沙量的秩相关系数均达到了显著水平,且均为负值,表明随着时间的推移,流域年径流量和输沙量均呈现显著减少的变化趋势。

1993 年以后整体上流域年输沙量累积距平呈波动降低的趋势,且与年径流量的突变年份一致。

罗玉沟流域降水具有明显的枯水期和丰水期,但年径流量和输沙量在 1993 年均呈波动降低的趋势,表明年降水量虽然是影响流域水沙变化的主要因素,但不同时期流域水沙变化与降水量并非完全一致。说明除降水因素外,流域水沙变化还受其他因素的影响。

根据 1986—2016 年罗玉沟流域径流量和输沙量突变点年份,即 1993 年,将流域水沙数据分为两个时期,1986—1993 年和 1994—2016 年(图 2)。由图可

知,不同时期流域年径流量与输沙量均呈现较好的线性关系,但不同时期流域水沙关系存在不同,1994—2016 年时期流域输沙量随径流量增加的幅度明显小于 1986—1993 年阶段的增幅。

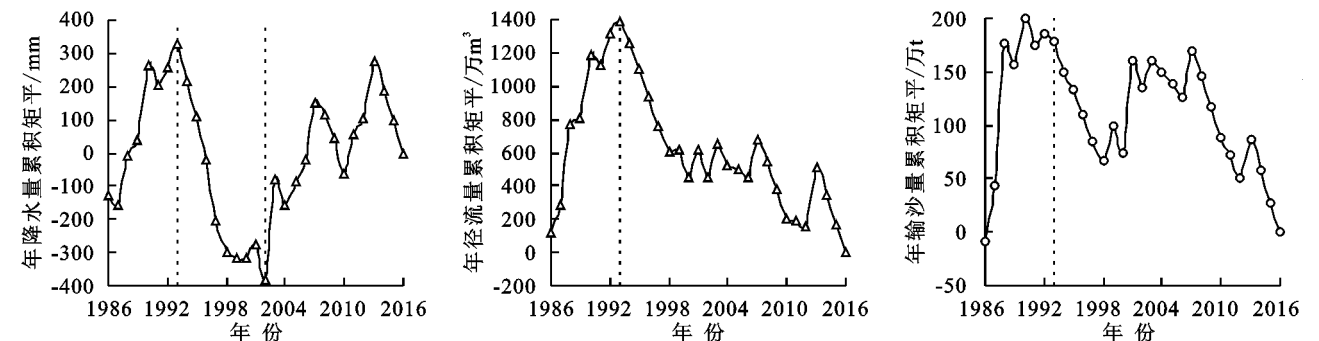


图 1 罗玉沟流域年降水量累积距平,年径流量累积距平和年输沙量累积距平

**Fig. 1** Accumulative anomaly of annual precipitation, annual runoff and annual sediment in Luoyugou watershed

2.2.2 流域水沙变化影响因素分析 影响流域水沙变化的因素主要是气候和人类活动。对于气候因素而言,由于黄土高原地区气温变化不显著,对流域径流量的影响远小于其他因素,因此本文暂未考虑气温变化导致的蒸发量对流域径流输沙的影响<sup>[21]</sup>,主要分析降水因素对流域水沙变化的影响。对罗玉沟流域而言,流域面积相对较小,且无大规模的取水等活动,因而影响流域水沙关系的人类活动主要体现在不同时期流域下垫面条件改变,主要是水土流失综合治理对土地利用方式的改变。

将突变年份之前的时期作为基准期,发生突变之后的时期作为水土保持措施期。将措施期各年累积降水量带入基准期双累积曲线建立的回归方程,得到计算年径流量和年输沙量<sup>[8,10]</sup>。不同时段计算值的差异即为降水对径流量或输沙量的影响量;同时段理论值与实测值之间的差值即为水土保持措施对径流量或输沙量的影响量(图 3)。

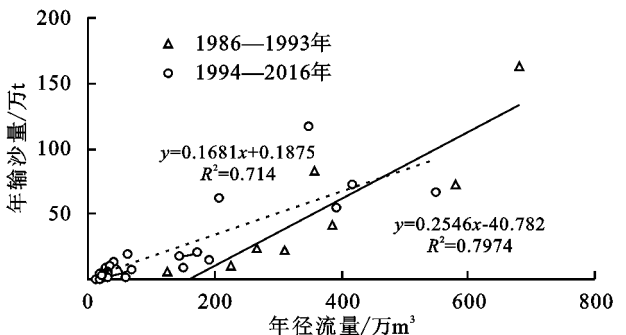


图 2 不同时期罗玉沟流域水沙关系

**Fig. 2** Relationship between runoff and sediment in different periods of Luoyugou watershed

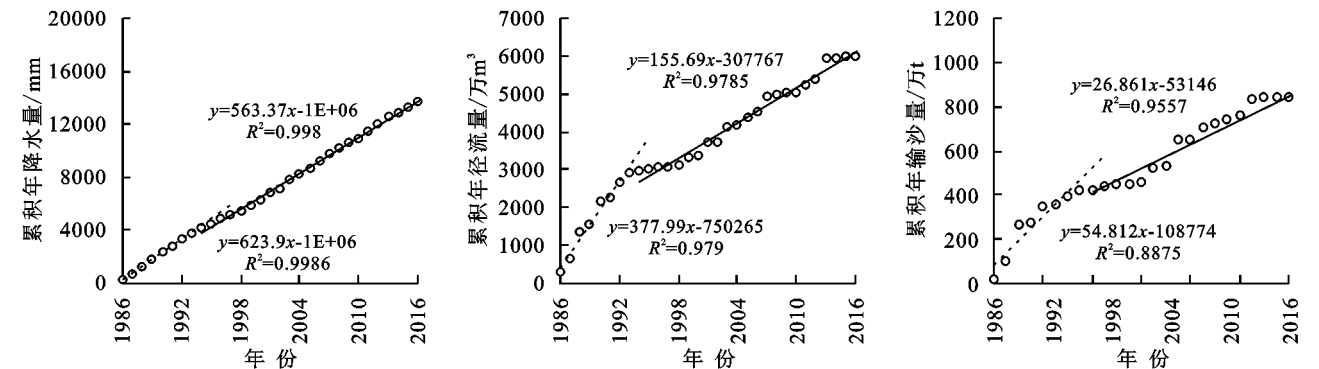


图 3 罗玉沟流域不同时期累积降雨量-年份;累积径流量-年份;累积输沙量-年份关系

**Fig. 3** Relationship of cumulative rainfall-year, cumulative runoff-year and cumulative sediment-year at different stages in Luoyugou watershed

计算结果见表 3。由表可知,与 1986—1993 年基准期相比,1994—2016 年降水和水土保持措施对流域径流量减少的贡献率分别为 16.50%和 83.50%,对流域输沙量减少分别为 19.03%和 80.97%。由此表明,1994—2016 年水土保持措施对流域径流量和输沙量的变化存在显著影响,且对流域年输沙量贡献率小于对年径流量贡献率。

### 3 讨论

#### 3.1 降水对流域水沙变化影响

降水是影响流域水沙变化的主要因素之一,黄土高原的径流和泥沙主要是由极端暴雨产生的<sup>[22]</sup>。对黄河中游多沙粗沙区水沙变化主控因素研究表明,流域降水对流域径流量、输沙量的影响介于 1.0%~41.1%和



1.7%~34.0%<sup>[8]</sup>。赵阳等<sup>[23]</sup>和寇馨月等<sup>[24]</sup>通过分析罗玉沟流域 1986—2008 年和 1986—2010 年水沙数据,指出气候变化对径流和泥沙变化的贡献率分别为 33.1%,

表 3 降水和水土保持措施对罗玉沟流域径流量、输沙量的影响

时段	降水量		径流量		降水 影响/%	水保 措施/%	输沙量		降水 影响/%	水保 措施/%
	斜率	变化率/%	斜率	变化率/%			斜率	变化率/%		
1986—1993 年	623.90	—	377.99	—	—	—	54.81	—	—	—
1994—2016 年	563.37	−9.70	155.69	−58.81	16.50	83.50	26.86	−50.99	19.03	80.97

利用皮尔逊Ⅲ型频率曲线分析方法对罗玉沟流域 1986—2016 年年降水量进行丰水年、平水年和枯水年的划分(25%,50%,25%),罗玉沟流域丰水年、平水年和枯水年年降雨量分界点分别为 620.9,453.8 mm。由 1986—2016 年罗玉沟流域年降水量年际变化可知,罗玉沟流域年降水存在明显的丰水期和枯水期,例如 1994—1998 年期间流域年均降水量仅 424.8 mm,尤其是 1997 年,降水量仅 367.3 mm,属于明显的枯水期。按照不同降水频率对流域水沙关系分析可知(图 4),不同降水水平年流域水沙关系存在明显不同,枯水期由于较低降水量导致此时期的产流产沙量明显低于其他时期。张守红等<sup>[25]</sup>对无定河流域的研究指出,枯水期降雨减少对径流、输沙减少的贡献率较大,分别达到 29.0%和 30.3%。由于观测时限的限制,1993 年以前罗玉沟流域无明显的枯水期水沙观测资料,因此在以往定量研究降水和水土保持措施对流域水沙贡献的影响时,并未充分考虑枯水期对流域水沙变化的影响,其结果有可能低估降水对流域水沙变化的贡献率<sup>[9,26]</sup>。

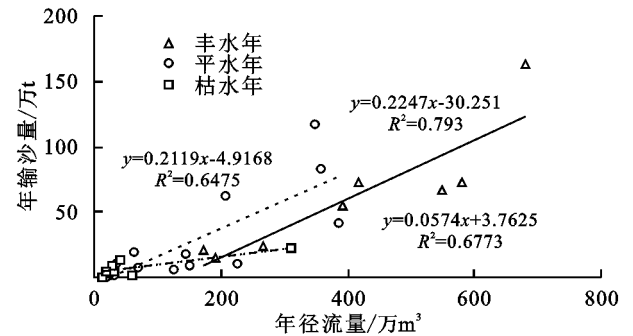


图 4 罗玉沟流域不同降水水平年流域水沙关系

Fig. 4 Relationship between runoff and sediment of different rainfall levels in Luoyugou watershed

3.2 水土保持措施对流域水沙变化的影响

下垫面条件不同,流域水沙关系存在明显差异。对黄河上中游径流量变化<sup>[27]</sup>和黄土高原藉河流域<sup>[28]</sup>研究指出,人类活动及其引起的土地利用变化对流域径流量的贡献分别为 84.9%和 90.2%。对罗玉沟流域而言,影响流域水沙关系的人类活动主要体

32.5%和 18.48%,27.15%。而本文的研究结果则分别为 16.50%和 19.03%,表明贡献率分析方法以及数据时序长短等可能对分析结果存在一定影响<sup>[20,25]</sup>。

现在不同时期流域水土流失综合治理活动。罗玉沟流域大规模水土流失综合治理自 20 世纪 80 年代中期开始,但流域综合治理的蓄水减沙效益一般在造林初期较低,随着植被的生长而逐渐增大。郑金丽等研究结果指出,流域大规模水土保持措施开展、水利工程的兴建时间是影响黄河流域降雨—径流关系发生转变的重要因素<sup>[29]</sup>。

罗玉沟流域 1986—2016 年不同时期水土保持措施面积分布见表 4。由表可知,不同时期罗玉沟流域梯田面积呈增加趋势,与 1986 年梯田面积相比,2013 年流域梯田面积增加了 8.0 倍;1993 年以后,流域林地面积呈增加—降低的趋势,而草地面积整体上呈缓慢增加趋势,主要是由于流域内部分林地逐渐转变为草地。与坡耕地相比,梯田和林草地可以有效增加流域涵养水源的能力,也可以在一定程度上减少水土流失量,使得流域年输沙量迅速降低<sup>[30-31]</sup>。而本文研究结果表明,1993 年以后,流域的年径流量和年输沙量均呈现出不同程度的降低趋势,与流域水土保持措施发挥效应的年限基本吻合。此外,1998 年以来,依托黄河流域水土保持藉河示范区项目,罗玉沟流域开展了新一轮水土流失综合治理,对 2000 年以后流域水沙同样具有一定影响。

表 4 不同时期罗玉沟流域水土保持措施面积

Table 4 Soil and water conservation measures area in Luoyugou watershed in different periods hm <sup>2</sup>					
措施 类型	年份				
梯田	1986	1993	2001	2009	2013
林地	292.93	353.9	404.66	1847.16	2641.54
草地	892.7	1366.52	1603.69	1473.12	1410.29
	706.78	476.14	476.97	851.27	923.47

除梯田和林草等水土保持措施外,1993—2016 年流域开展了水土保持沟道治理工程,先后修建了 20 多座淤地坝,这些工程措施在沟道治理中发挥了重大作用。淤地坝的修建对于控制流域侵蚀产沙,减少泥沙输移方面作用显著<sup>[32]</sup>。

由表 5 可知,与 1986—1993 年相比,1994—2016

年在流域年降水量基本接近的情况下(变化率 0.8%~7.1%),流域年径流量减少 32.6%~89.6%,年输沙量降低 39.3%~74.1%,表明流域水土保持综合治理对不同频次降水下流域年径流量和输沙量均有显著影响,且对

枯水年径流量和输沙量的影响幅度最大。穆兴民等<sup>[33]</sup>对甘肃西峰南小河沟流域杨家沟和董庄沟的研究指出,水土保持的作用使小流域枯水年径流减少最显著,丰水年减少较小,本文的研究结果与其一致。

表 5 1986—2016 年罗玉沟流域不同降水频率水文参数变化

水平年	1986—1993 年			1994—2016 年			变化率		
	年降水	年径流	年输沙	年降水	年径流	年输沙	年降水	年径流	年输沙
	量/mm	量/万 m <sup>3</sup>	量/万 t	量/mm	量/万 m <sup>3</sup>	量/万 t	量/mm	量/万 m <sup>3</sup>	量/万 t
丰水年	696.8	510.3	86.3	717.0	343.8	45.9	2.9	32.6	46.8
平水年	555.9	273.4	35.1	516.5	95.6	21.3	7.1	65.0	39.3
枯水年	421.9	310.5	21.7	425.1	32.3	5.6	0.8	89.6	74.1

此外,对罗玉沟流域 1986—2016 年年最大含沙量进行 Spearman 秩次相关检验,结果表明,多年最大含沙量呈极显著降低变化趋势。晏清洪等<sup>[34]</sup>研究指出,不同次降水雨型下,水土保持措施对小流域产流输沙的影响存在明显不同,水土保持对降雨量大、降雨强度大的雨型减水减沙效果最好,表明水土保持措施对流域次降雨条件下的水沙过程也具有显著影响。

4 结 论

(1) 1986—2016 年罗玉沟流域年降水量的波动程度远小于年径流量和年输沙量,流域年降水量随时间变化无显著增减趋势,而流域年径流量和输沙量随时间呈现显著减少的变化趋势。年降水量在 1993 年、2000 年发生突变;年径流量和年输沙量仅在 1993 年发生突变。1986—1993 年和 1994—2016 年流域年径流量与输沙量均呈现较好的线性关系,且 1994—2016 年时期流域输沙量随径流量增加的幅度明显小于 1986—1993 年阶段的增幅。

(2) 与 1986—1993 年相比,1994—2016 年期间降水和水土保持措施对流域径流量减少的贡献率分别为 16.50%和 83.50%,对流域输沙量减少分别为 19.03%和 80.97%。水土保持措施对流域水沙减少起主导作用,且对径流量变化的贡献率大于输沙量。不同降水水平年,流域水沙关系存在明显不同,枯水期由于降水量少导致产流产沙量明显低于其他时期。不同降水水平年下,水土保持措施对流域径流和泥沙的减幅分别为 32.6%~89.6%和 39.3%~74.1%。

参考文献:

[1] Wang Y, Liu W Z, Li Z, et al. Effect of comprehensive management on runoff and sediment reduction in Yanwachuan Watershed, Loess Tableland, China [J]. Nature Environment & Pollution Technology, 2014,13

(3):465-472.  
[2] 严坤.三峡库区农业生产方式改变及其对水土流失与面源污染影响:以万州区五桥河流域为例[D].北京:中国科学院大学(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所),2020.  
Yan K. Impact of changes in agricultural production mode in the Three Gorges Reservoir Area on soil and water loss and non-point source pollution: Taking Wuqiao River Basin in Wanzhou District as an example[D]. Beijing:University of the Chinese Academy of Sciences (Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences),2020.  
[3] Zheng M G, Yang J S, Qi D L, et al. Flow-sediment relationship as functions of spatial and temporal scales in hilly areas of the Chinese Loess Plateau [J]. Catena, 2012,98(17):29-40.  
[4] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2017,148:126-137.  
[5] 刘晓燕,刘昌明,杨胜天,等.基于遥感的黄土高原林草植被变化对河川径流的影响分析[J].地理学报,2014,69(11):1595-1603.  
Liu X Y, Liu C M, Yang S T, et al. Influences of shrubs-herbs-arbor vegetation coverage on the runoff based on the remote sensing data in Loess Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2014,69(11):1595-1603.  
[6] Zheng M G, Qin F, Yang J S, et al. The spatio-temporal invariability of sediment concentration and the flow-sediment relationship for hilly areas of the Chinese Loess Plateau [J].Catena, 2013,109:164-176.  
[7] Li L J, Zhang L, Wang H, et al. Assessing the impact of climate variability and human activities on streamflow from the Wuding River basin in China [J]. Hydrological Processes, 2010,21(25):3485-3491.  
[8] 孙倩,于坤霞,李占斌,等.黄河中游多沙粗沙区水沙变

- 化趋势及其主控因素的贡献率[J].地理学报,2018,73(5):945-956.
- Sun Q, Yu K X, Li Z B, et al. The trends of stream-flow and sediment and their driving factors in the middle reaches of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73(5):945-956.
- [9] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近50年泾河流域降雨—径流关系变化及驱动因素定量分析[J].农业工程学报,2015,31(14):165-171.
- Guo A J, Chang J X, Wang Y M, et al. Variation characteristics of rainfall-runoff relationship and driving factors analysis in Jinghe river basin in nearly 50 years[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(14):165-171.
- [10] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].地理学报,2012,67(3):388-397.
- Wang S J, Yan Y X, Yan M, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan rainage basin: application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(3):388-397.
- [11] 孙兆峰,王双银,刘晶,等.秃尾河流域径流衰减驱动力因子分析[J].自然资源学报,2017,32(2):310-320.
- Sun Z F, Wang S Y, Liu J, et al. Driving force analysis of runoff attenuation in Tuwei River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017,32(2):310-320.
- [12] 龚时旸,蒋德麒.黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理[J].中国科学,1978(6):671-678,707.
- Gong S Y, Jiang D Q. The soil loss and treatment in a small watershed in loess area in the middle reaches of Yellow River[J]. *Science in China*, 1978(6):671-678, 707.
- [13] 张含玉.黄河中游多沙粗沙区侵蚀产沙变化特征及影响因子分析[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- Zhang H Y. Spatiotemporal variation of soil erosion and its influence factors in the Middle Reaches of the Yellow River[D]. Beijing: Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, the University of Chinese Academy of Sciences and ministry of Education, 2016.
- [14] 于国强,李占斌,张茂省,等.水土保持措施对黄土高原小流域重力侵蚀的调控机理研究[J].土壤学报,2012,49(4):646-654.
- Yu G Q, Li Z B, Zhang M S, et al. Mechanisms of soil and water conservation measures regulating gravitational erosion in small watersheds on Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012,49(4):646-654.
- [15] 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.
- Yao W Y, Ru Y Y, Kang L L. Effect of flood retention and sediment reduction with different allocation system of water and soil conservation measures [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004,18(2): 28-31.
- [16] 蒋定生,江忠善,侯喜禄,等.黄土高原丘陵区水土流失规律与水土保持措施优化配置研究[J].水土保持学报,1992,6(3):14-17.
- Jiang D S, Jiang Z S, Hou X L, et al. A study on process of soil and water conservation and disposition model of its control measures in loess hilly regions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(3): 14-17.
- [17] 顾朝军,穆兴民,孙文义,等.极端暴雨洪水及侵蚀产沙对延河流域植被恢复响应的比较研究[J].自然资源学报,2017,32(10):1755-1767.
- Gu C J, Mu X M, Sun W Y, et al. Comparative analysis of the responses of rainstorm flood and sediment yield to vegetation rehabilitation in the Yanhe river basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017,32(10): 1755-1767.
- [18] 吕继强,张晓伟,沈冰,等.和田河年径流序列变化特征及驱动因素分析[J].水力发电学报,2010,29(5):165-169.
- Lv J Q, Zhang X W, Shen B, et al. Variation trend and primary driving factors of the annual runoff in Hetian river[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2010,29(5):165-169.
- [19] 穆兴民,巴桑赤烈, Zhang L,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.
- Mu X M, Ba S, Zhang L, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2):36-41.
- [20] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.
- Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010,30(4):47-51.
- [21] Xu J X. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity[J]. *Quaternary International*, 2011,244(2):230-237.
- [22] 陈瑞东,温永福,高鹏,等.极端降水条件下延河水沙特征对比分析及其影响因素[J].生态学报,2018,38(6):

- 1920-1929.
- Chen R D, Wen Y F, Gao P, et al. Comparative analysis of flow and sediment characteristics of the Yanhe River under extreme rainfall conditions and research on influence factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6):1920-1929.
- [23] 赵阳,余新晓.黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J].*北京林业大学学报*, 2013, 35(3):39-45.
- Zhao Y, Yu X X. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of loess hilly-gully region[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(3):39-45.
- [24] 寇馨月,王玉杰,张晓明,等.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[J].*北京林业大学学报*, 2015, 37(7):85-93.
- Kou X Y, Wang Y J, Zhang X M, et al. Runoff-sediment relationship and driving force of typical watershed in the third sub-region of hilly loess area, northwestern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(7):85-93.
- [25] 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.
- [26] 张淑兰,王彦辉,于澎涛,等.泾河流域近50年来的径流时空变化与驱动力分析[J].*地理科学*, 2011, 29(6):721-727.
- Zhang S L, Wang Y H, Yu P T, et al. Spatio-temporal variance of annual runoff in jinghe river basin of Northwest China in past 50 years and its main causes[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 29(6):721-727.
- [27] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J].*水科学进展*, 2014, 25(2):155-163.
- Li E H, Mu X M, Zhao G J. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2):155-163.
- [28] 郑培龙,李云霞,寇馨月,等.黄土高原藉河流域径流对气候和土地利用变化的响应[J].*水土保持通报*, 2016, 36(2):250-253.
- Zheng P L, Li Y X, Kou X Y, et al. Effects of climate variation and land use change on runoff in Jiehe watershed of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2):250-253.
- [29] 郑金丽,严子奇,李东,等.黄河流域降雨—径流关系时空演变研究[J].*水资源与水工程学报*, 2021, 32(4):77-85, 92.
- Zheng J L, Yan Z Q, Li D, et al. Spatio-temporal evolution of the rainfall-runoff relationship in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(4):77-85, 92.
- [30] 冉大川,姚文艺,吴永红,等.延河流域1997—2006年林草植被减洪减沙效应分析[J].*中国水土保持科学*, 2014, 12(1):1-9.
- Ran D C, Yao W Y, Wu Y H, et al. Effect of forest-grass vegetation on reducing flood and sediment from 1997 to 2006 in Yanhe basin[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12(1):1-9.
- [31] 刘晓燕,杨胜天,王富贵,等.黄土高原现状梯田和林草植被的减沙作用分析[J].*水利学报*, 2014, 45(11):1293-1300.
- Liu X Y, Yang S T, Wang F G, et al. Analysis on sediment yield reduced by current terrace and shrubs-herbs-arbor vegetation in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(11):1293-1300.
- [32] 李勉,李平,杨二,等.黄土丘陵区淤地坝建设后小流域泥沙拦蓄与输移特征[J].*农业工程学报*, 2017, 33(18):80-86.
- Li M, Li P, Yang E, et al. Characteristics of sediment retention and transport in small watershed after construction of check dams in Loess Hilly Area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18):80-86.
- [33] 穆兴民,王文龙,徐学选.黄土高原沟壑区水土保持对小流域地表径流的影响[J].*水利学报*, 1999, 30(2):73-77.
- Mu X M, Wang W L, Xu X X. The influence of soil and water conservation on the surface runoff in the watersheds in the gully plateau region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(2):73-77.
- [34] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].*农业机械学报*, 2014, 45(2):169-175.
- Yan Q H, Yuan C P, Lei T W, et al. Effect of rain-storm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2):169-175.