

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.023.

刘春月, 信忠保, 秦瑞杰, 等. 1986—2018年黄土丘陵区典型小流域不同水文年水沙变化[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 126-135.

Liu Chunyue, Xin Zhongbao, Qin Ruijie, et al. Variation of Runoff and Sediment of the Typical Watershed in Loess Hilly Region in the Different Hydrological Years During the Period from 1986 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 126-135.

# 1986—2018年黄土丘陵区典型小流域 不同水文年水沙变化

刘春月<sup>1,2</sup>, 信忠保<sup>1,2</sup>, 秦瑞杰<sup>3</sup>, 张满良<sup>3</sup>, 刘晓<sup>3</sup>

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学 山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.黄河水利委员会天水水土保持科学试验站, 甘肃 天水 741000)

**摘要:** [目的]探讨黄土丘陵区罗玉沟典型小流域水沙变化趋势以及不同水文年径流输沙对水土流失治理的响应差异, 量化降水和人类活动对流域水沙影响的相对贡献, 以期为黄土丘陵第三副区流域水土流失治理和水资源管理提供参考。[方法]基于罗玉沟流域 1986—2018 年的降雨、径流、输沙等数据, 采用 Mann-Kendall 检验法、累积距平法及双累积曲线法分析流域水沙变化趋势及驱动因素。[结果]1986—2018 年罗玉沟流域河流由常流河转变为季节性河流, 干河日数显著上升 ( $p < 0.01$ ), 2000 年以来干河日数多在 300 d 以上; 同期, 罗玉沟流域径流输沙显著下降 ( $p < 0.05$ ), 与基准期 1986—1993 年相比, 1994—2007 年减水减沙率分别为 61.9%, 44.3%, 2008—2018 年径流输沙分别减少 67.5%, 76.4%; 在 2008—2018 年平水年和枯水年间罗玉沟流域输沙模数分别为  $(1\ 080.0 \pm 107.5)$  t/km<sup>2</sup>,  $(167.8 \pm 111.4)$  t/km<sup>2</sup>, 而在暴雨频发丰水年, 输沙模数仍接近 4 000 t/km<sup>2</sup>; 流域产流产沙能力降低, 水沙关系发生改变, 相同径流条件下输沙量减少, 即流域径流含沙量水平降低, 开始变清; 相比降雨变化而言, 人类活动是流域水沙变化的主导因素, 1994—2007 年人类活动对减水减沙的贡献率分别为 83.3% 和 79.5%, 而 2008—2018 年人类活动的贡献率分别为 91.8%, 94.4%, 表明流域水沙变化受人类活动影响越来越大, 其中, 坡改梯及退耕还林还草工程是主要影响因素。[结论]因沟道治理工程建设不足, 罗玉沟流域在丰水年因沟道重力侵蚀导致流域输沙仍然剧烈, 因此, 需要加强沟道治理进一步减少流域水土流失。

**关键词:** 黄土高原; 水沙变化; 丰水年; 水土保持措施; 趋势分析; 归因分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0126-10

## Variation of Runoff and Sediment of the Typical Watershed in Loess Hilly Region in the Different Hydrological Years During the Period from 1986 to 2018

Liu Chunyue<sup>1,2</sup>, Xin Zhongbao<sup>1,2</sup>, Qin Ruijie<sup>3</sup>, Zhang Manliang<sup>3</sup>, Liu Xiao<sup>3</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Tianshui Soil and Water Conservation Science Experimental Station, Yellow River Water Conservancy Commission Tianshui, Gansu 741000, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to explore the variation trend of water and sediment in the watershed and the differences in the response of runoff and sediment transport to soil and water loss control in different hydrological years, to quantify the relative contributions of rainfall and human activities to the water and sediment in the watershed, and to provide reference for water and soil loss control and water

收稿日期: 2022-10-28

修回日期: 2022-12-19

资助项目: 国家自然科学基金“黄土高原水土保持措施对小流域泥沙连通性的影响机制”(42177319)

第一作者: 刘春月(1999—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: liuchunyue66@163.com

通信作者: 信忠保(1978—), 男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持研究。E-mail: xinzhongbao@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

resources management in the third sub-region of the loess hills. [Methods] Based on the data of precipitation, runoff and sediment transport in Luoyugou Watershed of loess hilly region from 1986 to 2018, the water and sediment trend and driving factors were explored by using Mann-Kendall test, cumulative anomaly method and double cumulative curve method. [Results] From 1986 to 2018, the rivers in Luoyugou Watershed changed to seasonal river from permanent river and the number of dry river days increased significantly ( $p < 0.01$ ), with more than 300 dry river days since 2000. During the same period, the runoff and sediment transport in Luoyugou Watershed decreased significantly ( $p < 0.05$ ), relatively to those in 1986—1993, the runoff and sediment transport from 1994 to 2007 reduced by 61.9% and 44.3%, respectively. The runoff and sediment transport from 2008 to 2018 reduced by 67.5% and 76.4%, respectively. In normal year and dry year, the sediment transport modulus in Luoyugou Watershed from 2008 to 2018 was  $(1\ 080.0 \pm 107.5)$  t/km<sup>2</sup> and  $(167.8 \pm 111.4)$  t/km<sup>2</sup>, respectively. However, the transport modulus of sediment was still close to 4 000 t/km<sup>2</sup> in wet years. The capacity of runoff and sediment yield decreased, the relationship between water and sediment changed, the sediment transport decreased under the same runoff condition, i. e., the runoff sediment content level decreased and the runoff began to become clear. Compared with rainfall change, human activities were the dominant factor on water and sediment change in the watershed. The contribution rate of human activities to runoff and sediment reduction from 1994 to 2007 was 83.3% and 79.5%, respectively, while the contribution rate of human activities from 2008 to 2018 was 91.8% and 94.4%, respectively, indicating that runoff and sediment change in the watershed was increasingly influenced by human activities. Among them, the slope to terrace project and the project of returning farmland to forest or grassland were the main influencing factors. [Conclusion] Due to the lack of channel control project construction and the gravity erosion of the channel in wet years, there is still server sediment transport in Luoyugou Watershed. Therefore, it is necessary to enhance the channel control to further reduce soil and water loss in the watershed.

**Keywords:** Loess Plateau; runoff and sediment variation; wet year; soil and water conservation measures; trend analysis; attribution analysis

流域水沙变化对气候变化与人类活动十分敏感,其与河道演变、河势稳定等密切相关<sup>[1]</sup>。定量研究水沙变化及输移过程,可为水利部门掌握河流特征奠定基础<sup>[2]</sup>,便于进一步解释河流的泥沙来源和时空变化规律,对流域生态安全及水资源开发利用具有重要的科学意义<sup>[3]</sup>。黄土高原是我国水土流失重点区域之一,同时也是生态环境建设的重要区域<sup>[4]</sup>。在气候变化日益显著和人类活动范围扩大、活动频率不断加快的背景下,黄土高原进行了一系列水土流失治理工程<sup>[5-6]</sup>,使得流域水循环过程发生了显著变化,黄河水沙明显减少<sup>[7-9]</sup>。多年来,在黄土高原水沙变化及其驱动机制方面已有大量研究,包括水沙变化特征<sup>[10-11]</sup>、水沙关系变化<sup>[12-14]</sup>、水沙归因分析等<sup>[15-17]</sup>。黄土高原水沙变化复杂,不同水文年侵蚀输沙强度差异悬殊,以往研究多注重于水沙年际变化特征分析,但针对不同水文年水沙对降水和水土流失治理的响应分析较少。

研究以黄土高原丘陵区第三副区的典型流域罗玉沟流域为研究区,基于 1986—2018 年流域内长时

间序列降水及水沙数据,采用 Mann-Kendall 非参数检验、累积距平法、双累积曲线等方法,在探讨流域多年来水沙变化趋势的基础上,分析不同水文年罗玉沟径流输沙对流域内水土流失治理情况在响应上的差异,并量化降水变化和人类活动对流域水沙影响的贡献率,以期增进黄土高原水沙变化及其对水土流失治理响应的认识,为黄土高原水土流失治理与水资源管理提供参考。

## 1 研究区概况

甘肃天水罗玉沟流域是黄委会天水水土保持观测研究站的主观测流域,位于甘肃省天水市北郊,是渭河支流藉河左岸的一级支沟。罗玉沟流域发源于天水市麦积区凤凰山境内的凤凰山南麓,由西北流向东南,在天水市秦州区东关城区注入藉河,属黄土丘陵区第三副区典型流域。流域为典型黄土梁状丘陵地貌,地势东高西低,呈狭长羽毛状,海拔 1 194~1 897 m,主沟道长 21.81 km,平均比降 3.35%,流域面积 72.79 km<sup>2</sup>(图 1)。该流域属大陆性季风气候,

多年(1986—2018 年)平均降水量( $565.7 \pm 118.1$ ) mm,汛期(5—10 月)平均降水量( $463.0 \pm 16.8$ ) mm。流域地表土壤类型主要分为山地褐色土、山地灰褐土及冲积土 3 类,其中山地灰褐土分布占流域 91.7%。土地利用类型以梯田、林地为主,流域农耕地约占流域总面积的 55.0%,流域内苹果、樱桃、桃、梨等经济林分布广泛。主要农作物有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、土豆(*Solanum tuberosum*)等,流域内乔木有杨树(*Populus*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等,灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、狼木刺(*Sophora viciifolia*)等。

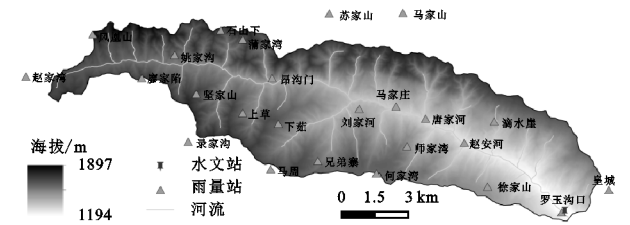


图 1 罗玉沟流域雨量站、水文站分布

Fig. 1 Distribution of precipitation and hydrographic stations in Luoyugou Watershed

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

1986—2018 年逐月降水、径流、输沙水文数据来自黄河水利委员会天水水土保持科学试验站,其中降水数据源于天水站在罗玉沟流域先后设立的 25 个雨量站,由于雨量站布设较为合理,通过算术平均法得到流域平均降雨量,径流输沙数据源自罗玉沟把口站的观测数据。

### 2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 检验法 Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐使用的非参数检验法,该方法优势在于不需要样本遵从一定的分布也不受少数异常值的干扰,可用于水文变化的趋势检验和突变点检测<sup>[18]</sup>。M-K 趋势检验通过时间序列标准化变量  $Z$  值表明趋势变化, $Z > 0$ ,存在上升趋势, $Z < 0$ ,存在下降趋势。当  $Z$  的绝对值大于 1.96,2.58 时,表示其分别通过了 95%,99% 的显著性检验。同时计算顺序、逆序时间序列的秩序列,得到 UF,UB,若 UF 和 UB 在 95%置信度临界线内相交,交点即为对应序列的突变时间。

2.2.2 累积距平法 时间序列中的数值与均值的差称为距平,每年的距平进行相加得到累积距平。当曲线上升,表明累积距平值增大,离散数据大于均值;若

曲线下降,表明累积距平值减小,离散数据小于其均值,曲线趋势发生改变时即发生变异。

2.2.3 双累积曲线法 双累积曲线法是检验 2 个参数间关系一致性及其变化的常用方法,可用于水文气象要素的趋势性变化及强度的分析<sup>[19]</sup>。研究采用双累积曲线法,定量分析气候变化和人类活动对水沙变化的贡献率。绘制双累积曲线将突变点前期视为基准期,后期为变化期,对累积降雨量和累积径流量、输沙量进行线性回归得到线性关系式,进而得到降雨变化和人类活动对水沙变化的贡献率。

## 3 结果和分析

### 3.1 水沙变化趋势分析

干河日数包含河流干枯日数和连底冻日数,表示流域干枯断流日数,流域河流发生干枯断流影响流域水文变化,研究干河日数变化,有利于了解流域河流水文情势,以便进一步分析径流整体演变情况。1986—2018 年,罗玉沟流域河流由常流河转为季节性河流,干河日数 M-K 检验  $Z$  值为 3.3,总体呈显著增加趋势( $p < 0.01$ ),1986—1997 年干河日数逐年急剧增加,由 0 增至 357 d,多年平均干河日数为( $163.2 \pm 127.4$ ) d,1998—2018 年干河日数均值为( $305.8 \pm 42.5$ ) d,后期较前期增长 87.4%(图 2A)。

降雨量呈不显著上升趋势( $p > 0.1$ ), $Z$  值为 1.1(图 2B)。径流输沙显著下降( $p < 0.05$ ), $Z$  值分别为 -2.2,-2.4(图 2B、图 2C)。其中,输沙减少趋势较径流更为显著,且波动性更大,变异系数为 1.3,表现为丰水年与枯水年侵蚀输沙强度差异大,因此,有必要开展不同水文年水沙过程及其影响因素研究。在 1986—1993 年径流输沙急剧下降,多年平均径流深为( $50.4 \pm 25.3$ ) mm,多年平均输沙模数为( $7\ 230.9 \pm 7\ 214.8$ ) t/km<sup>2</sup>;1994—2018 年径流输沙呈波动变化,年际间变化较大,此时多年平均径流深为( $17.9 \pm 20.2$ ) mm,多年平均输沙模数为( $3\ 006.2 \pm 4\ 002.9$ ) t/km<sup>2</sup>。

年均含沙量  $Z$  值为 -1.9,呈不显著下降趋势( $p < 0.1$ ),整体变化可分为 3 个阶段:(1) 1986—1994 年含沙量呈现明显的下降趋势,其间多年年均含沙量为( $109.1 \pm 78.3$ ) kg/m<sup>3</sup>;(2) 1995—2004 年含沙量处于高位阶段,年均含沙量为( $264.7 \pm 70.7$ ) kg/m<sup>3</sup>,年际间变化较大;(3) 2005—2018 年含沙量水平大幅度下降,年均含沙量为( $87.5 \pm 48.8$ ) kg/m<sup>3</sup>,流域径流出现变清趋势(图 2C)。

### 3.2 水沙突变分析

运用累积距平法和 M-K 检验法分析罗玉沟水沙

变化的阶段性特征,确定水沙变化的突变时间。由径流深输沙模数累积距平图可知,径流深在 1993 年和 2007 年出现极大值,输沙模数在 1990 年与 2007 年出现极大值,即径流输沙的可能突变点为 1993 年、1990 年和 2007 年。总体上罗玉沟流域水沙变化大致经历了 3 个时期:1986—1993 年,水沙累积距平曲线呈上升趋势,总体处于丰水丰沙阶段;1994—2007 年,曲线呈波动下降趋势,其中输沙波动强于径流,处于平水平沙阶段;2008—2018 年,径流输沙累积距平明显下降,属于枯水枯沙阶段(图 3)。M-K 突变检验显示径流深、输沙模数在 0.05 显著性水平上发生突变,径流深突变点为 1993 年,输沙模数可能在 1993 年、1998 年、2007 年发生突变(图 4)。

结合 M-K 检验和累积距平分析可知,流域水沙变化时间较为一致,为方便整体分析比较,确定水沙突变时间为 1993 年和 2007 年,将 1986—2018 年罗玉沟流域水沙时间序列统一分为基准期 1986—1993 年、措施期 1994—2007 年和 2008—2018 年。相比于基准期,1994—2007 年干河日数增长率为 239.5%,2008—2018 年增长率为 255.0%,流域多年平均干河日数超过 300 d。1994—2007 年减水减沙率分别为 61.9%,44.3%,2008—2018 年减水减沙率分别为 67.5%,76.4%,两个时期相比径流变化差异较小,2008—2018 年减沙幅度大于 1994—2007 年。与基准期相比,含沙量在 1994—2007 年增加 85.2%,在 2008—2018 年减少 38.2%,此时年均含沙量小于 1986—2018 年多年年均含沙量(表 1)。

3.3 不同水文年水沙变化

采用《水文情报预报规范》(GB/T22482-2008)<sup>[20]</sup>中的距平百分率  $p$  将 1986—2018 年降雨量划分为丰平枯 3 个层次( $p>10\%$  为丰水年,  $-10\%<p<10\%$  为平水年,  $p<-10\%$  枯水年),丰水年、平水年和枯水年的平均降水量分别为  $(700.7\pm68.6)$  mm,  $(574.7\pm40.2)$  mm

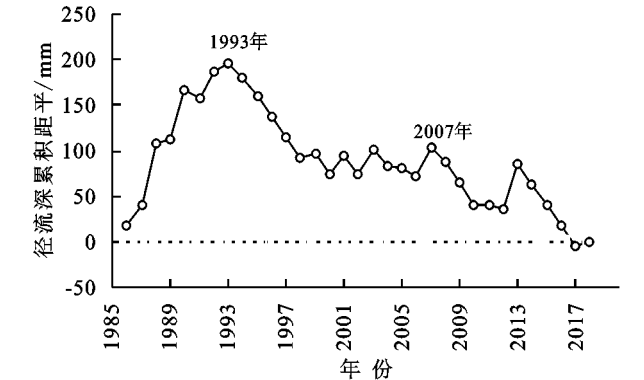


图 3 1986—2018 年罗玉沟流域年径流深及年输沙模数累积距平

和  $(454.5\pm32.2)$  mm。干河日数在不同水文年均呈明显的增加趋势,基准期不同水文年干河日数显著低于多年平均值,措施期平水年、枯水年间干河日数均超过 300 d,丰水年也接近 300 d(表 2)。

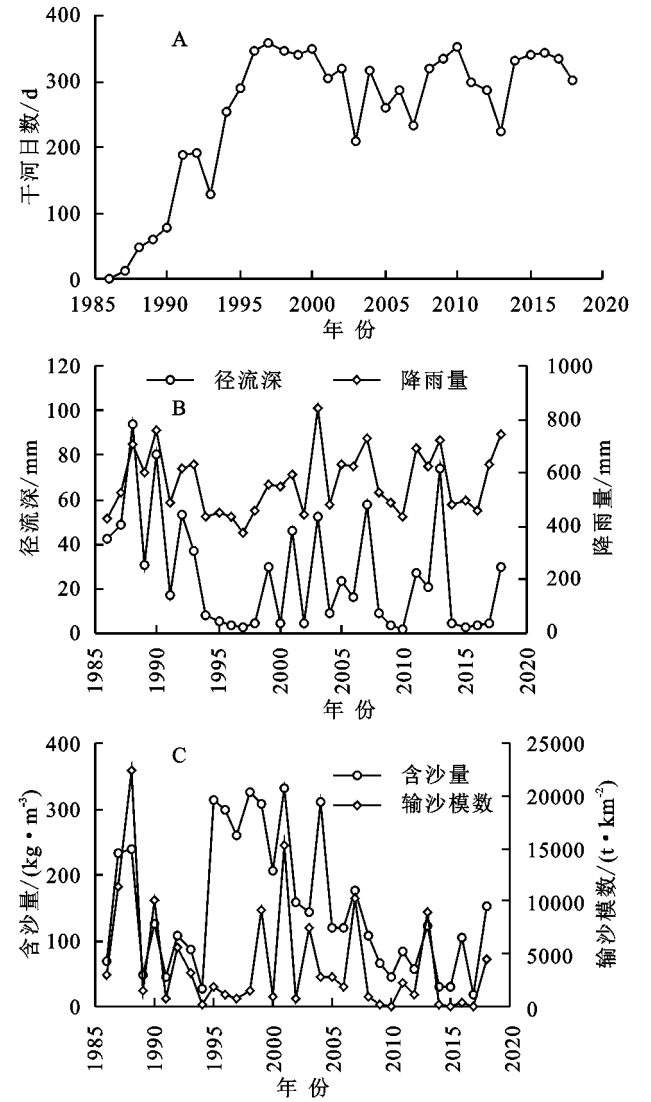


图 2 1986—2018 年罗玉沟流域水文要素变化趋势  
Fig. 2 Variation trend of hydrological elements in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018

Fig. 3 Cumulative anomaly of annual runoff and sediment yield in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018



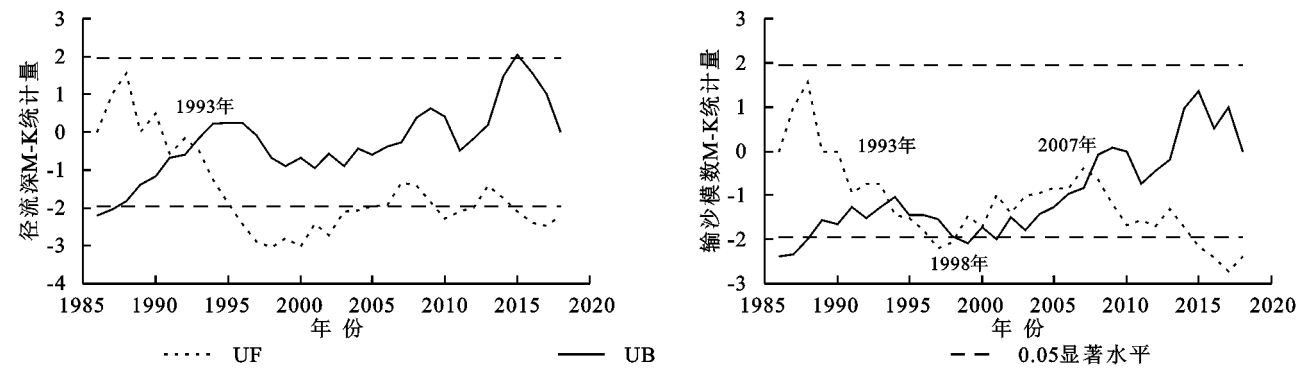


图 4 基于 M-K 检验的罗玉沟流域水沙突变诊断

Fig. 4 Detection of abrupt point of water and sediment in Luoyuguo Watershed based on Mann-Kendall test

表 1 不同时期水文要素统计特征值

Table 1 Statistical characteristic values of hydrological elements in varied periods

水文要素	1986—1993 年	1994—2007 年	2008—2018 年	1986—2018 年	变化率%	
	(P1)	(P2)	(P3)		P1—P2	P1—P3
干河日数/d	88.6±74.0	300.8±46.8	314.5±36.6	253.9±107.5	239.5	255.0
降雨量/mm	595.0±110.6	543.7±130.5	572.3±111.8	565.7±118.1	—8.6	—3.8
径流深/mm	50.4±25.3	19.2±19.7	16.4±21.6	25.8±25.4	—61.9	—67.5
输沙模数/(t·km <sup>-2</sup> )	7230.9±7214.8	4028.0±4603.3	1705.8±2754.2	4030.4±5175.4	—44.3	—76.4
含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	119.2±77.1	220.7±97.7	73.7±43.4	147.1±100.9	85.2	—38.2

整体而言,相比于基准期,径流深在措施期枯水年减幅较大,1994—2007 年与 2008—2018 年枯水年减水率分别为 81.6%,89.6%,具有良好的减水效果。然而流域丰水年产流依旧强烈,径流深分别为(37.5±20.7) mm,(33.8±29.0) mm,为枯水年径流深的 6.8 倍与 10.9 倍(表 2)。

在基准期,罗玉沟侵蚀输沙不同水文年差异显著,丰水年输沙模数高达(11 848.7±9 685.3) t/km<sup>2</sup>,表现出强烈的侵蚀输沙特征,平水年侵蚀模数仍较高,为(6 185.7±4 982.8) t/km<sup>2</sup>,枯水年只有(1 872.2±1 558.3) t/km<sup>2</sup>,丰水年输沙模数是枯水年输沙模数

的 6.3 倍。近期罗玉沟流域在平水年、枯水年的输沙模数分别为(1 080.0±107.5) t/km<sup>2</sup>, (167.8±111.4) t/km<sup>2</sup>,水土流失治理效果显著,但在丰水年输沙模数为(3 941.3±3 974.6) t/km<sup>2</sup>,接近 4 000 t/km<sup>2</sup>,水土流失仍然较为剧烈。相对于基准期,1994—2007 年含沙量在丰水年有所减少,而平水年和枯水年输沙以暴雨作用下高含沙水流为主要泥沙输出方式,因此在平水年与枯水年含沙量发生增长,分别由(129.3±94.6) kg/m<sup>3</sup>, (57.3±17.5) kg/m<sup>3</sup> 增至(280.7±66.5) kg/m<sup>3</sup>, (241.5±110.1) kg/m<sup>3</sup>,而在 2008—2018 年,不同水文年年均含沙量皆减少,表明罗玉沟径流有变清趋势(表 2)。

表 2 不同水文年水文要素特征值

Table 2 Characteristic values of hydrological elements in varied hydrological years

水文要素	水文年	1986—1993 年	1994—2007 年	2008—2018 年	1986—2018 年
干河日数/d	丰水年	85.3±40.5	247.5±34.1	289.3±46.8	218.5±94.8
	平水年	88.3±93.1	331.0±23.1	302.5±23.3	232.9±131.0
	枯水年	94.0±132.9	318.3±35.9	339.6±8.4	293.9±96.2
降雨量/mm	丰水年	699.1±67.5	706.5±101.0	696.0±48.6	700.7±68.6
	平水年	580.9±51.1	569.0±25.0	573.9±68.2	574.7±40.2
	枯水年	460.2±42.5	439.8±31.4	472.8±25.0	454.5±32.2
径流深/mm	丰水年	70.1±29.7	37.5±20.7	33.8±29.0	45.0±28.6
	平水年	44.4±11.7	26.7±21.0	15.1±8.0	30.4±18.2
	枯水年	29.9±18.1	5.5±2.3	3.1±0.9	8.1±10.7
输沙模数/(t·km <sup>-2</sup> )	丰水年	11848.7±9685.3	5588.5±3905.9	3941.3±3794.6	6696.8±6256.9
	平水年	6185.7±4982.8	8413.8±7221.1	1080.0±107.5	5744.8±5598.8
	枯水年	1872.2±1558.3	1256.6±838.0	167.8±111.4	955.7±965.1
含沙量/(kg·m <sup>-3</sup> )	丰水年	150.5±79.1	139.3±27.4	93.7±57.5	125.7±56.0
	平水年	129.3±94.6	280.7±66.5	81.4±36.2	174.1±111.4
	枯水年	57.3±17.5	241.5±110.1	54.3±31.4	148.4±123.6

3.4 水沙关系分析

3.4.1 降雨和径流输沙关系 1986—2018 年流域降雨和径流输沙关系发生了变化(图 5),相关点随时间

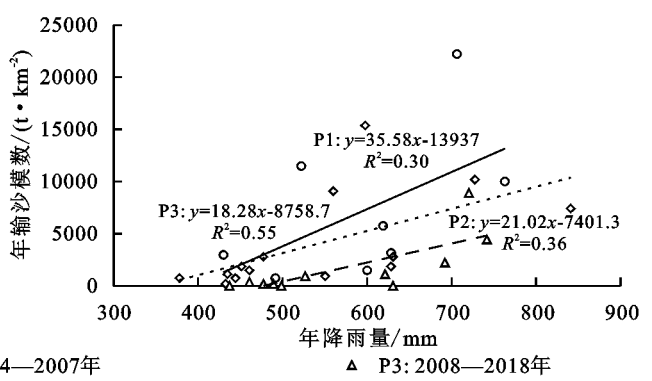
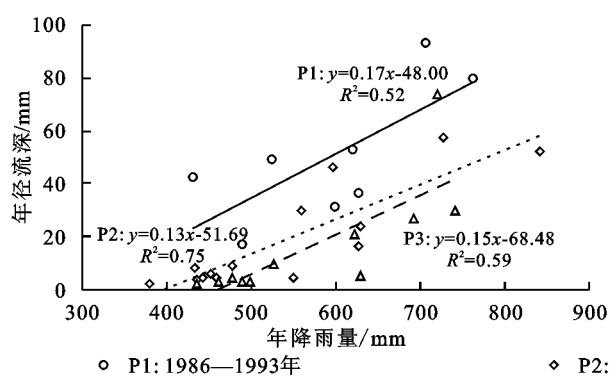


图 5 1986—2018 年罗玉沟流域降雨和径流输沙关系

Fig. 5 Relationship of precipitation with runoff and sediment yield in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018

3.4.2 年输沙量与年径流量关系 1986—2018 年罗玉沟流域 3 个时期水沙关系发生变化(图 6),回归方程斜率逐渐下降,由 0.25 降至 0.12,表明相同径流条件下流域产沙能力下降。且  $R^2$  由 0.80 升至 0.96,说明流域水沙关系趋于良好。进一步用方差分析判断不同时期年输沙量—年径流量回归方程中斜率是否存在显著差异,结果发现 1986—1993 年与 1994—2007 年回归方程两斜率之间并无显著差异( $p=0.389$ ),而 2008—2018 年与 1986—1993 年差异显著( $p=0.015$ ),说明水沙关系在 2008—2018 年发生变化,除了植被恢复影响外,流域沟道工程建设影响也不可忽视。

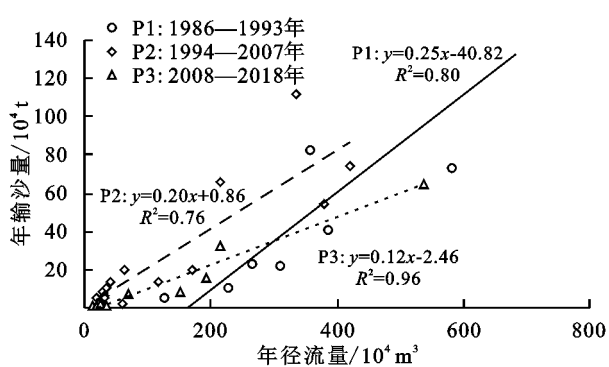


图 6 1986—2018 年罗玉沟流域年输沙量径流量关系

Fig. 6 Relationship between annual sediment yield and runoff in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018

3.4.3 月输沙量与月径流量关系 1986—2018 年流域 3 个时期月输沙量与月径流量关系呈现两种曲线类型,与 1986—1993 年相比,1994—2007 年与 2008—2018 年曲线左移,形状改变,说明月尺度径流输沙关系发生改变(图 7)。1986—1993 年曲线先顺时针后逆时针,径流量在 7 月和 8 月出现两个峰值,而后期只出现一个月径流量峰值,说明流域径流分布更加集中。1994—2007

发展整体下移,在水土保持建设下,年产流量和产沙量相对减少,径流输沙对降雨的敏感性减小。在相同降雨条件下,流域产流产沙能力下降。

年与 2008—2018 年呈顺时针曲线,上半年输沙量逐渐增加,下半年逐渐减少,上半年流域输沙量大于下半年,这种曲线在黄土高原较为常见<sup>[21-22]</sup>。1994—2007 年径流量减少,而月输沙量水平高于 1986—1993 年,曲线较为舒展。而 2008—2018 年曲线较窄,上半年和下半年间输沙量区别较小,径流量和输沙量均减少,输沙量整体处于较低水平。

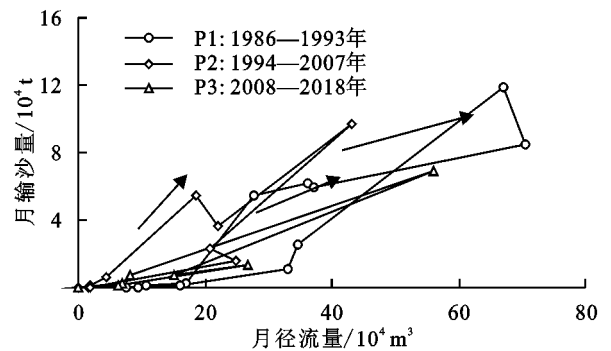


图 7 1986—2018 年罗玉沟流域月输沙量径流量关系

Fig. 7 Relationship between monthly sediment yield and runoff in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018

3.5 气候变化和人类活动对流域水沙变化影响

流域径流输沙变化是人类活动与气候变化共同作用的结果,为探究二者对流域水沙的影响,将研究期分为 3 个阶段,运用双累积曲线法定量评估气候变化和人类活动对水沙变化的贡献率,其中气候变化只考虑降雨因素,径流深、输沙模数和降雨量的双累积曲线见图 8,将变化期的累积降雨量代入天然期的线性回归方程,各阶段拟合系数  $R^2$  均大于 0.85,拟合程度良好。

以 1986—1993 年为基准期,1994—2007 年,人类活动和降雨变化对径流变化的贡献率分别为 83.3%, 16.7%,对输沙变化的贡献率分别为 79.5%, 20.5%; 2008—2018 年,人类活动和降雨变化对径流变化的

影响分别为 91.8%,8.2%,对输沙变化的相对贡献率分别为 94.4%,5.6%(表 3,表 4)。人类活动在不同

时期对水沙变化均占主导地位,且随着水土保持建设不断加强人类活动作用越来越强。

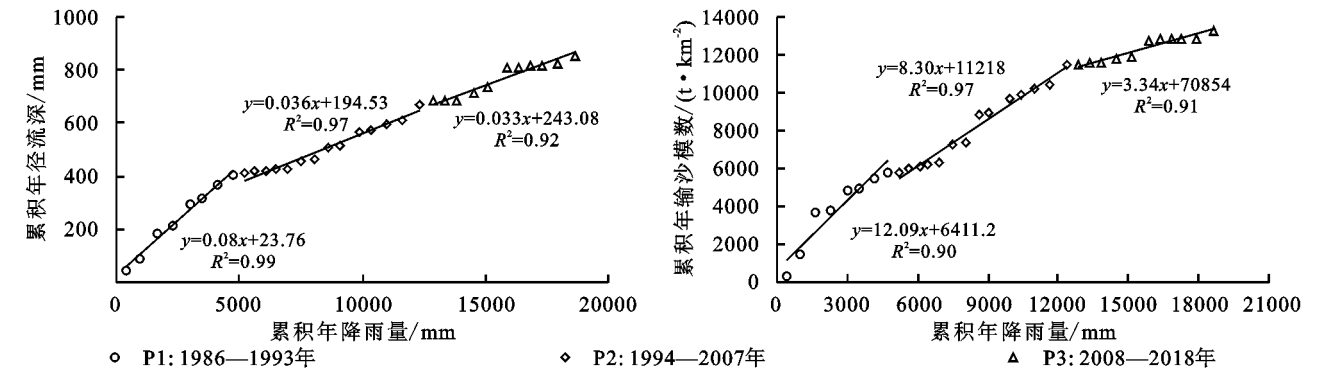


图 8 1986—2018 年罗玉沟流域水沙双累积曲线

Fig. 8 Double accumulative curve of water and sediment in Luoyugou Watershed from 1986 to 2018

表 3 降水变化和人类活动对罗玉沟流域径流变化的相对贡献

Table 3 Relative contributions of precipitation change and human activities to runoff change in Luoyugou Watershed

时期	实测	计算	减少量/ mm	降水变化		人类活动	
	径流深/mm	径流深/mm		减少量/mm	百分比/%	减少量/mm	百分比/%
1986—1993 年	50.4	52.5					
1994—2007 年	19.2	45.2	31.2	5.2	16.7	26.0	83.3
2008—2018 年	16.4	47.6	34.0	2.8	8.2	31.2	91.8

表 4 降水变化和人类活动对罗玉沟流域输沙变化的相对贡献

Table 4 Relative contributions of precipitation change and human activities to sediment yield change in Luoyugou Watershed

时期	实测输沙模数/ (t·km <sup>-2</sup> )	计算输沙模数/ (t·km <sup>-2</sup> )	减少量/ (t·km <sup>-2</sup> )	降水变化		人类活动	
				减少量/ (t·km <sup>-2</sup> )	百分比/%	减少量/ (t·km <sup>-2</sup> )	百分比/%
1986—1993 年	7230.9	7997.1					
1994—2007 年	4028.0	6574.5	3202.9	656.4	20.5	2546.5	79.5
2008—2018 年	1705.8	6921.2	5525.1	309.7	5.6	5215.4	94.4

4 讨论

4.1 河流情势变化分析

研究发现流域干河日数呈显著增加趋势( $p < 0.01$ ),流域经历了从常流河向季节性河流的转变。流域河流断流频发除了受到降雨补给不足的影响外,根据流域在丰水年干河日数仍保持较高水平的情况,可以推测出人类活动也是导致河流断流的重要因素。罗玉沟流域水土保持工作起步较早,最早可追溯至 1956 年,流域从 20 世纪 80 年代中期开始了大规模水土流失治理,截至 1995 年流域梯田所占面积比例已超过 50%<sup>[23-25]</sup>。1999 年,罗玉沟流域启动退耕还林试点工作,2008 年实现退耕还林还草几乎全覆盖。自从退耕还林以来,幼林地和果园面积分别由 2002 年的 816.0 hm<sup>2</sup>,410.5 hm<sup>2</sup>,增加到 2008 年的 1 547.5 hm<sup>2</sup>,1 061.9 hm<sup>2</sup>,分别增长了 89.6%和 158.7%,耕地向幼林地和果园进行转变,耕地面积大幅下降<sup>[26]</sup>。且从 2000 年开始流域增建了 16 座小型淤地坝<sup>[27-28]</sup>,2004—2006 年修建了

50 个水窖,进行了一系列沟道治理工程(21 座)<sup>[14]</sup>。流域水土保持治理使得流域径流输沙显著减少,流域产流能力不断下降,促进了河流断流。此外,经济社会发展导致城市和工业用水增加,罗玉沟所在天水市秦州区和麦积区地下含水层浅,藉河流域地下水超采严重,地下水位严重下降,减少了河流供给,对罗玉沟沟道流量有一定影响。而河流由常流河转为季节性河流使河流生态功能受损,地表水资源减少,不利于当地居民生产生活。

4.2 水沙变化趋势分析

自 20 世纪 90 年代以来,罗玉沟年径流量、输沙量的年际变化表现出明显的波动性,年际间变化较大,在平水年和枯水年径流量输沙量很低,而在丰水年则表现出较为强烈的侵蚀输沙特征。张晓明等<sup>[29]</sup>在罗玉沟支沟桥子东西沟分析了土地利用/覆被变化的水文动态响应,研究表明在平水年和枯水年径流系数减少率高于丰水年。刘卉芳等<sup>[30]</sup>在黄土高原马家沟流域分析了降水变化下的水沙响应,结果显示在丰

水年径流输沙普遍较大,在枯水年水沙普遍较少,与本研究结果相似。此外,年均含沙量整体呈不显著下降趋势( $p < 0.1$ ),但在 1994—2007 年含沙量数值较高,原因为该时段内流域降雨量较少,枯水年较多,年内产沙多集中于暴雨,如 1995 年 8 月的两次暴雨,河流含沙量高达  $458.3 \text{ kg/m}^3$ ,共输沙 9.5 万 t,占全年输沙量的 72.1%,由此可知该时段内河流含沙量剧增更多是由于暴雨强烈输沙的缘故,这与安乐平等<sup>[31]</sup>得出的结论相似—流域输沙多在汛期,汛期输沙多在暴雨。作为水土流失治理流域,罗玉沟流域侵蚀输沙主要在丰水年遭受大暴雨形式输出,因此,当前水土保持重点在于如何减缓极端暴雨条件下的水土流失,有关人员在设计水土保持措施时应充分考虑暴雨时侵蚀产沙的特点。

### 4.3 水沙关系变化分析

相比于基准期,1994—2007 年由于坡改梯及植被恢复等水土保持措施,流域产流产沙能力下降,径流输沙分别减少 61.9% 和 44.3%,但是流域年尺度水沙关系并未发生改变。2008—2018 年水沙关系曲线与 1986—1993 年曲线存在显著差异( $p < 0.05$ ),说明流域水沙关系在 2008—2018 年发生变化。由于植被并不能改变黄土区泥沙来源丰富的特点,只能通过减少径流及含沙量来减少产沙<sup>[32-33]</sup>,而 2008—2018 年流域输沙大幅度下降而径流量、含沙量减少幅度较小,说明 2000 年来增加的淤地坝等工程措施减少了沟道中泥沙来源,沟道治理工程减沙效果更为显著,改变了流域水沙关系。晏清洪等<sup>[34]</sup>在黄土丘陵区吕二沟流域分析指出以植物措施为主的水土流失综合治理并没有显著影响流域水沙关系。刘卉芳等<sup>[35]</sup>研究发现在黄土区植被工程复合作用下水土保持效果显著,在各项水土保持措施中,淤地坝减沙贡献率最大,在 40% 以上。Zhang 等<sup>[36]</sup>研究表明黄土高原植被恢复措施主要通过改变径流进而减少产沙,而淤地坝等工程措施通过改变水沙关系来减少输沙。这与本文研究结果相似,即坡改梯和林草措施并不能明显改善水沙关系,而淤地坝等工程措施效果显著。

## 5 结 论

(1) 1986—2018 年罗玉沟流域河流从常流河变为季节性河流,2000 年以来干河日数超过 300 d 以上;在水土保持建设驱动下,罗玉沟流域径流输沙呈现明显下降趋势,与 1986—1993 年基准期相比,2008—2018 年径流深和输沙模数分别下降了 67.5% 和 76.4%。

(2) 在 2008—2018 年平水年和枯水年间,罗玉沟流域输沙模数分别为  $(1\ 080.0 \pm 107.5) \text{ t/km}^2$ ,

$(167.8 \pm 111.4) \text{ t/km}^2$ ,但丰水年水土流失仍然较为严重,近  $4\ 000 \text{ t/km}^2$ 。流域产流产沙能力降低,水沙关系发生改变,相同径流条件下输沙量减少,即含沙量水平降低,流域径流有变清趋势。

(3) 随着水土保持工作的持续建设,罗玉沟流域水沙过程受人类活动影响更加强烈,1994—2007 年和 2008—2018 年两个时期,人类活动对罗玉沟流域径流量变化贡献率分别为 83.3%,91.8%,对输沙量下降相对贡献分别为 79.5% 和 94.4%,坡改梯及退耕还林还草工程建设是罗玉沟流域水沙锐减的主要因素。当下罗玉沟流域土壤侵蚀防治重点应该放在丰水年暴雨条件下发生的沟道侵蚀,需加强沟道治理工程建设,进一步降低丰水年水土流失。

### 参考文献:

- [1] 隆院男,唐蓉,蒋昌波,等.近 60 年湘江流域水沙特性及其对人类活动的响应[J].农业工程学报,2018,34(24):132-143.  
Long Y N, Tang R, Jiang C B, et al. Variability characteristics of runoff-sediment discharge and their response to human activities in Xiang River Basin in recent 60 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(24):132-143.
- [2] 郭彦,侯素珍,夏润亮,等.1955—2014 年黄河内蒙古河段水沙变化特征分析[J].水资源与水工程学报,2020,31(4):70-77.  
Guo Y, Hou S Z, Xia R L, et al. Characteristics of runoff-sediment variation in Inner Mongolia Reach of Yellow River from 1955 to 2014[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020,31(4):70-77.
- [3] 谢发兵,赵广举,穆兴民,等.黄河干流近 70 年来水沙关系变化[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(5):1-9.  
Xie F B, Zhao G J, Mu X M, et al. Variation of runoff and sediment load in the mainstream of the Yellow River over the past 70 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(5):1-9.
- [4] 穆兴民,李朋飞,刘斌涛,等.1901—2016 年黄土高原土壤侵蚀格局演变及其驱动机制[J].人民黄河,2022,44(9):36-45.  
Mu X M, Li P F, Liu B T, et al. Spatial-temporal development and driving mechanisms of erosion on the Chinese Loess Plateau between 1901 and 2016[J]. Yellow River, 2022,44(9):36-45.
- [5] 谢敏,张晓明,赵阳,等.北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应[J].中国水利水电科学研究院学报,2019,17(1):39-44.  
Xie M, Zhang X M, Zhao Y, et al. The mechanism of response of runoff and sediment yield to precipitation and LUCC in Beiluohe River basin[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower



- Research, 2019, 17(1):39-44.
- [6] 金钊.黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性[J].地球环境学报, 2022, 13(2):121-131.  
Jin Z. Ecohydrological effects and sustainability of the Grain for Green Project on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(2):121-131.
- [7] 彭杨, 陈仕豪, 时玉龙.黄河下游水沙变化多时间尺度集对分析[J].泥沙研究, 2021, 46(2):35-41.  
Peng Y, Chen S H, Shi Y L, et al. Multiple time-scale set pair analysis on relationship between runoff and sediment in the lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(2):35-41.
- [8] 宁怡楠, 杨晓楠, 孙文义, 等.黄河中游河龙区间径流量变化趋势及其归因[J].自然资源学报, 2021, 36(1):256-269.  
Ning Y N, Yang X N, Sun W Y, et al. The trend of runoff change and its attribution in the middle reaches of the Yellow River [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1):256-269.
- [9] 范俊健, 赵广举, 穆兴民, 等.1956—2017年黄河上游水沙变化及其驱动因素[J].中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(3):1-9.  
Fan J J, Zhao G J, Mu X M, et al. Variation of runoff and sediment load and their driving factors on the upper stream of the Yellow River from 1956 to 2017[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(3):1-9.
- [10] 魏艳红, 焦菊英.皇甫川流域 1955—2013 年水沙变化趋势与周期特征[J].水土保持研究, 2017, 24(3):1-6.  
Wei Y H, Jiao J Y. Variation tendency and periodic characteristics of streamflow and sediment discharge in Huangfuchuan Watershed from 1955 to 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3):1-6.
- [11] 许文龙, 赵广举, 穆兴民, 等.近 60 年黄河上游干流水沙变化及其关系[J].中国水土保持科学, 2018, 16(6):38-47.  
Xu W L, Zhao G J, Mu X M, et al. Variations and correlations of runoffs and sediment loads in the main stream of the upper reaches of the Yellow River over the past 60 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(6):38-47.
- [12] 冉大川, 张栋, 董飞飞, 等.西柳沟流域近期水沙关系变化特征分析[J].人民黄河, 2015, 37(12):1-5.  
Ran D C, Zhang D, Dong F F, et al. Characteristics of the recent change of relationship between runoff and sediment in Xiliugou Watershed [J]. Yellow River, 2015, 37(12):1-5.
- [13] 蔺鹏飞, 张晓萍, 刘二佳, 等.黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应[J].水土保持学报, 2015, 29(1):1-6.  
Lin P F, Zhang X P, Liu E J, et al. Responses of the water and sediment behavior to vegetation restoration in typical catchments on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(1):1-6.
- [14] 秦瑞杰, 李桂芳, 李平.降水和土地利用变化对罗玉沟流域水沙关系的影响[J].水土保持学报, 2018, 32(5):29-34, 40.  
Qin R J, Li G F, Li P. Impacts of precipitation and land use change on runoff and sediment in Luoyugou Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5):29-34, 40.
- [15] 薛帆, 张晓萍, 张鲁, 等.基于 Budyko 假设和分形理论的水沙变化归因识别:以北洛河流域为例[J].地理学报, 2022, 77(1):79-92.  
Xue F, Zhang X P, Zhang L, et al. Attribution recognition of streamflow and sediment changes based on the Budyko hypothesis and fractal theory: A case study in the Beiluo River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(1):79-92.
- [16] 蒋凯鑫, 于坤霞, 曹文洪, 等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报, 2020, 36(4):143-149.  
Jiang K X, Yu K X, Cao W H, et al. Attributional comparative analysis of runoff and sediment change in typical basin of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4):143-149.
- [17] 夏露, 马耘秀, 宋孝玉, 等.黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J].水土保持学报, 2021, 35(6):109-115.  
Xia L, Ma Y X, Song X Y, et al. Study on the variation and attribution of runoff and sediment in Xinsui River Watershed of middle Yellow River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6):109-115.
- [18] 张涵丹, 卫伟, 薛莲.基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J].水土保持研究, 2015, 22(6):183-189.  
Zhang H D, Wei W, Xue S. Analysis on the variation of temperature and precipitation in Dingxi based on R/S and Mann-Kendall test[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6):183-189.
- [19] 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.
- [20] 中华人民共和国水利部.水文情报预报规范:GB/T 22482-2008 [S].北京:中国标准出版社, 2008:1-10.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for hydrological information and hydrological forecasting: GB/T 22482-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008:1-10.
- [21] 史运良, 杨戊, 任美镔.长江中下游干流的逆时针型水

- 沙关系分析[J].地理学报,1986,53(2):157-167.
- Shi Y L, Yang W, Ren M E. Analysis of discharge-sediment concentration with counterclockwise correlations at the middle and lower Changjiang[J]. Acta Geographica Sinica, 1986,53(2):157-167.
- [22] 任美镠,史运良.黄河输沙及其对渤海、黄海沉积作用的影响[J].地理科学,1986,6(1):1-12,101.
- Ren M E, Shi Y L. Sediment discharge of the Yellow River and its effect on sedimentation of the Bohai and Yellow Sea[J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(1):1-12,101.
- [23] 茅廷,雷启祥,韩玉峰.天水罗玉沟流域梯田效益分析[J].中国水土保持,1991,12(2):47-49,66.
- Mao T, Lei Q X, Han Y F. Analysis on benefits of terraced field in Luoyugou Gully Watershed in Tianshui city[J]. Soil and Water Conservation in China, 1991, 12(2):47-49,66.
- [24] 安乐平,赵力毅,脱忠平.天水市罗玉沟流域治理实践与思考[J].中国水土保持,2021,42(6):20-24.
- An L P, Zhao L Y, Tuo Z P. Practice and thoughts on Luoyugou Watershed treatment in Tianshui city[J]. Soil and Water Conservation in China, 2021,42(6):20-24.
- [25] 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.
- [26] 易扬,信忠保,覃云斌,等.生态植被建设对黄土高原农林复合流域景观格局的影响[J].生态学报,2013,33(19):6277-6286.
- Yi Y, Xin Z B, Qin Y B, et al. Impact of ecological vegetation construction on the landscape pattern of a Loess Plateau watershed [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(19):6277-6286.
- [27] 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.
- [28] 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,2012,34(12):96-99.
- Zhang L L. Study of comprehensive management of Luoyugou Watershed and its effectiveness[J]. Yellow River, 2012,34(12):96-99.
- [29] 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/土地覆被变化对径流产沙的影响[J].北京林业大学学报,2007,29(6):115-122.
- Zhang X M, Yu X X, Wu S H, et al. Landuse-land-cover change on sediment production of runoff in typical watershed in the loess gully-hilly region of China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6):115-122.
- [30] 刘卉芳,鲁婧,王昭艳,等.黄土区典型小流域降水变化下的水沙响应研究[J].水生态学杂志,2017,38(4):11-17.
- Liu H F, Lu J, Wang Z Y, et al. Response of water and sediment to rainfall in a typical watershed of the Loess Plateau [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(4):11-17.
- [31] 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,2014,35(12):36-39,69.
- An L P, Qin R J, Kang T X, et al. Characteristic of runoff and sediment of Luoyugou Watershed of gullied rolling loess area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2014,35(12):36-39,69.
- [32] 郑明国.基于水沙关系框架的黄土区不同水保措施减沙贡献分割方法[J].农业工程学报,2020,36(7):173-183.
- Zheng M G. Partition of reducing sediment for various soil and water conservation measures of Loess Plateau in China based on runoff-sediment relationship [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(7):173-183.
- [33] 刘晓燕,党素珍,高云飞,等.黄土丘陵沟壑区林草变化对流域产沙影响的规律及阈值[J].水利学报,2020,51(5):505-518.
- Liu X Y, Dang S Z, Gao Y F, et al. The rule and threshold of the effect of vegetation change on sediment yield in the loess hilly region, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020,51(5):505-518.
- [34] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析[J].中国水土保持科学,2013,11(5):1-8.
- Yan Q H, Yuan C P, Lei T W, et al. Variation in the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of Lu'er-gou Watershed in the hilly-gully region on the Loess Plateau [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013,11(5):1-8.
- [35] 刘卉芳,朱毕生,解刚,等.黄土区小流域植被/工程复合作用下的泥沙效应[J].水生态学杂志,2017,38(5):7-13.
- Liu H F, Zhu B S, Xie G, et al. Vegetation combined with engineering controls for sediment reduction on the loess plateau [J]. Journal of Hydroecology, 2017, 38(5):7-13.
- [36] Zhang J J, Gao G Y, Fu B J, et al. Formulating an elasticity approach to quantify the effects of climate variability and ecological restoration on sediment discharge change in the Loess Plateau, China [J]. Water Resources Research, 2019,55(11):9604-9622.