

黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析

晏清洪¹, 原翠萍², 雷廷武^{1,3†}, 雷启祥⁴, 张满良⁴, 苏广旭⁴

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, 北京; 2. 北京国泰天平行土地规划设计有限公司, 100873, 北京;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100, 陕西杨凌;
4. 黄河水利委员会天水水土保持科学试验站, 741000, 甘肃天水)

摘要: 流域水沙关系的研究可为流域水土流失模型构建和水土保持效益评价提供科学依据。根据黄土丘陵沟壑区第三副区的吕二沟流域在1982—2010年间的74场次洪水事件水文泥沙数据, 对降雨、径流和输沙的关系进行分析, 并用Mann-Kendall法检验流域次洪水事件径流系数和平均含沙量的变化趋势和显著性。结果显示, 降雨量和降雨历时是流域径流和输沙的主要影响因素, 前期降雨量中前7天降雨量与径流系数的相关性最显著。吕二沟流域具有较好的水沙关系。通过Mann-Kendall法检验得到1985年8月24日发生的洪水事件是流域径流系数时间序列的突变点, 突变点之后径流系数呈显著减小趋势, 植被覆盖面积的增加是流域降雨-径流关系发生变化的主要原因。流域次洪水事件平均含沙量时间序列没有发生显著变化, 表明以植物措施为主的水土流失综合治理没有显著影响吕二沟流域的水沙关系。

关键词: 降水; 次洪水事件; 径流; 输沙; 水沙关系; 水土保持

中图分类号: TV122; S157 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3007(2013)05-0001-08

Variation in the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of Lu'ergou Watershed in the hilly-gully region on the Loess Plateau

Yan Qinghong¹, Yuan Cuiping², Lei Tingwu^{1,3}, Lei Qixiang⁴, Zhang Manliang⁴, Su Guangxu⁴

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, 100083, Beijing, China; 2. Beijing Grandtoppeak Tianpinghang Land Plan and Design Co., Ltd., 100873, Beijing, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, 712100, Yangling, Shaanxi, China; 4. Tianshui Soil and Water Conservation Station, Yellow River Conservation Commission, 741000, Tianshui, Gansu, China)

Abstract: Rainfall-runoff-sedimentation relationships are of great importance for predicting watershed soil erosion and evaluating the benefits of soil and water conservation in the watersheds. The hydrological data of 74 flood events of Lu'ergou Watershed on the Loess Plateau from 1982 to 2010 were used to investigate the relationships among rainfall, runoff and suspended sediment transport. The variations of event-based runoff coefficients and mean suspended sediment concentrations and their significance were identified using the Mann-Kendall test method. The results indicated that the precipitation and duration of rainfall event were the most relevant factors controlling the hydrological response. The most significant correlation was observed between runoff coefficient and 7-day antecedent precipitation. Sediment yield was closely related to runoff in Lu'ergou Watershed. The jump point for the sequence of the event-based runoff coefficient was the flood event on 24 August 1985. Afterwards, there was a significant decreasing trend in

收稿日期: 2013-02-22 修回日期: 2013-05-10

项目名称: 国家自然科学基金重点项目“黄土区多尺度小流域土壤水蚀动态过程模拟研究”(40635027); 黄河水土保持生态工程天水藉河重点支流治理(二期)项目“水土保持监测体系建设”

第一作者简介: 晏清洪(1986—), 男, 博士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: yqh19@126.com

† 通信作者简介: 雷廷武(1958—), 男, 教授。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: leitingwu@cau.edu.cn

the sequence of event-based runoff coefficient. The increase in the vegetation cover area in Lu'ergou Watershed was the main cause for the change of the rainfall-runoff relationship. There was no significant change for the sequence of event-based mean suspended sediment concentration, which indicated that the soil and water conservation based on vegetation measures had no significant effect on the runoff-sedimentation relationship of Lu'ergou Watershed.

Key words: precipitation; event-based flood; runoff; suspended sediment; runoff-sedimentation relationship; soil and water conservation

流域水土流失受气候变化和人类活动的双重影响^[1-6]。降雨是导致水土流失的原动力,降雨量、降雨强度及降雨历时等降雨特征与土壤侵蚀密切相关^[1,7]。人类活动通过改变土地利用方式和实施水土保持措施来改变流域下垫面,变化的土地覆被状况与近地表面的蒸散发、截留、填洼、下渗等水文要素及其产汇流过程密切相关,使产流产沙机制发生变化^[5,8-11]。黄土丘陵沟壑区是我国生态环境建设的重点地区。近年来,随着经济社会的快速发展和水土保持生态建设的大力推进,该地区的人类活动不断加剧。加之在气候变化的影响下,流域下垫面和降雨等水文要素进一步发生变化,从而引起流域水沙发生新的变化。只有了解流域水沙变化的原因,认识流域水沙关系的变化趋势,才能科学地制订流域水土流失治理方案。

黄土丘陵沟壑区流域水沙变化程度和原因,以及流域水沙关系的变化趋势已为多方所关注^[10]。黄土丘陵沟壑区许多流域具有较好的水沙关系^[11-12],虽然实施水土保持措施能减少黄土丘陵沟壑区流域的径流量和输沙量^[1-2,4,13]、改变径流和泥沙过程^[13-15],但郑明国等^[12]研究表明增加植被覆盖不会改变流域的水沙关系;而刘淑燕等^[9]研究得到黄土丘陵沟壑区对比流域桥子东沟和桥子西沟在次降雨量、降雨强度较小、土地利用变化不明显的情况下,2流域次降雨水沙关系差异不显著,在次降雨量、降雨强度较大和土地利用变化明显时2流域次降雨水沙关系差异显著。

目前,大多数研究者对流域水沙关系的研究,多采用线性函数或幂函数进行拟合分析流域出口径流量和输沙量之间的关系^[8,12,16-18]。尽管对流域水沙关系用线性函数或幂函数拟合可获得较满意的效果,但该方法也存在一些局限性,比如,当收集的径流和泥沙数据较少,并且数据中夹杂有异常点时,用线性函数或幂函数拟合所得的结果就变得十分不可靠。异常点因有较大的偏差,增加了残差大的数据对拟合线的影响,从而异常点会把拟合线拉得离它

更近一些,导致拟合线“失真”较大。而通常的做法是凭直觉和经验将异常值剔除,这样处理有2方面不足:一方面是剔除异常点后获得的线性拟合函数会因此受到影响(因为减少了样本量,尤其当数据较少时更为突出);另一方面,异常点恰好在某些方面真实反映了一些水沙变化的特殊情况,不应随意剔除。因此,需采用非参数统计检验方法来检验流域水沙关系的变化,避免少数异常值的干扰。

吕二沟流域在土壤侵蚀类型上可作为黄土丘陵沟壑区第三副区的典型代表,是水土流失综合治理的典型小流域,曾作为水土流失综合治理典型在全国推广^[19-20];因此,吕二沟流域可作为典型流域来探讨水土流失综合治理对流域水沙关系变化是否具有显著影响。笔者以吕二沟流域为研究对象,研究分析流域次洪水事件降雨、径流和输沙之间的关系,并采用 Mann-Kendall 法检验流域降雨-径流关系和径流-输沙关系的变化趋势和显著性,为进行流域治理规划和水土流失治理效益评价提供科学依据。

1 研究区概况

吕二沟流域位于甘肃省天水市南郊(E 105°41' ~ 105°45', N 34°30' ~ 34°35'),属于黄土丘陵沟壑区第三副区,是渭河支流藉河右岸的一级支沟,呈南—北流向(图1)。流域呈狭长带状,面积为12.01 km²,流域形状系数为0.25;地势南高北低,最高海拔1707 m,相对高差532 m,平均比降7.24%;流域内沟壑纵横,沟壑密度3.82 km/km²,沟壑总面积2.33 km²,占流域总面积的19.3%,溯源侵蚀严重。地质构造上属陇中盆地东南边缘地带,地层微向北倾斜,单斜构造,局部地方有断层。流域内共有8种土壤,分布最广的是梁坡的黄土质灰褐土,土壤质地为中壤,厚度在50 cm以上;其次为含黏土或砂砾薄层坡积黄土质灰褐土,土壤质地为中壤,厚25~100 cm;土壤质地为砂壤的砂砾质灰褐土型粗骨土及土壤质地为黏土、含少量粉砂的红黏土质灰褐土型粗骨土;其余土种分布很少^[7]。吕二沟流域上游(石

门以上)农田较少,植被较好,覆盖度70%以上,石门以下覆盖度较差^[7-8]。

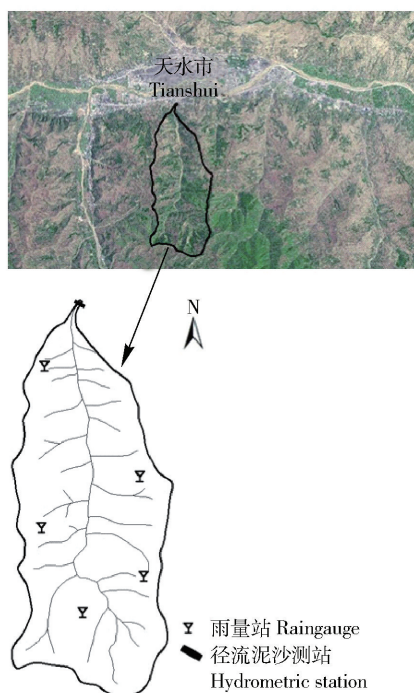


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study site

吕二沟流域在1982—2010年的平均降水量为597.9 mm。降水年际变化大:最大年降水量947.1 mm,出现在2003年;最小年降水量382.9 mm,出现在1996年。年内降水主要集中于6—9月,降水占全年降水量的85.6%,汛期降雨多以暴雨形式出现。根据1982—2010年水文观测资料,吕二沟流域平均年径流总量为33.34万 m^3 ,其中汛期平均径流量为27.89万 m^3 ,占年总量的83.6%;流域平均年输沙总量为2.43万t,其中汛期平均输沙量为2.14万t,占年总量的87.8%。

吕二沟流域于1953年开始进行选点调查,并确定为重点治理流域进行治理。1980年起,黄河水利委员会天水水土保持科学试验站积极配合地方又加大了对吕二沟坡面、沟道综合治理的力度,以植物措施为主,工程措施主要有挖鱼鳞坑、培地埂、建谷坊。1998年吕二沟流域被列入黄河流域水土保持藉河示范区工程项目治理流域。截至2000年底,吕二沟流域治理面积达到6.88 km^2 ,占流域总面积的57.3%,其中林地面积401.91 hm^2 (多系新造幼林),牧草地面积94.73 hm^2 ,水平梯田191.72 hm^2 ^[19]。此外,水利水土保持工程措施主要有拦泥坝1座,土柳谷坊101座,涝池7座,水窖多处,这些工程措施大部分已不能继续发挥效益^[19-20]。

吕二沟流域的土地利用动态变化情况见表1^[4]。1982年,流域坡耕地和草地占主要地位,分别占流域总面积的33.34%和32.76%,二者之和占流域总面积的66.10%,其次是林地、梯田、其他和裸地。到1993年,林地面积比例显著增长,达到31.45%,梯田、裸地和其他增长较少,坡耕地和草地面积比例分别减少到21.89%和28.79%。2004年,林地面积比例增长到42.29%,坡耕地面积略有增长,草地面积比例减少到19.23%。

表1 吕二沟土地利用类型占流域面积比例

Tab.1 Proportion of different land uses area in Lu'ergou Watershed

年份 Years	林地 Forest land	草地 Grassland	梯田 Terrace	坡耕地 Sloped cropland	裸地 Bare land	其他 Other
1982	19.11	32.76	14.91	33.34	0.25	0.73
1993	31.45	28.79	15.18	21.89	0.35	1.33
2004	42.29	19.23	13.50	23.26	0.35	1.37

2 数据来源与研究方法

本文所用到的吕二沟流域的水文泥沙数据来源于黄河水利委员会天水水土保持科学试验站,数据年限为1982—2010年,共计产生75场次洪水事件,其中有1场次洪水事件数据不完整,因此,筛选得到74场次洪水事件。吕二沟流域内布设了5个雨量站,在吕二沟流域出口设立了径流泥沙测站(图1)。

为了研究降雨特征对径流、输沙和水沙关系的影响,选取以下降雨、径流和输沙的相关变量进行皮尔逊相关分析:次降雨量(P , mm),一次降雨的总量;降雨历时(D , min),次降雨事件过程的长度;平均降雨强度(I , mm/h)和最大30 min降雨强度(I_{30max} , mm/h),降雨强度;前1天降雨量(P_{1d} , mm)、前3天降雨量(P_{3d} , mm)、前5天降雨量(P_{5d} , mm)、前7天降雨量(P_{7d} , mm)、前9天降雨量(P_{9d} , mm)和前11天降雨量(P_{11d} , mm),表征次洪水事件前期土壤水分情况;径流深(H , mm),单位面积流域产流量;径流系数(R_c),降雨量和径流量之间的转换关系,表征了流域的降雨产流能力;洪峰流量(Q_{max} , m^3/s),次洪水事件径流过程的峰值;输沙模数(M_s , t/km^2),单位面积流域输沙量;平均含沙量(S , kg/m^3),表征了次洪水事件的径流量和输沙量之间的平均关系;最大含沙量(S_{max} , kg/m^3),表征了次洪水事件的最大输沙能力。分析它们之间的关系对认识次洪水事件水沙变化的影响因素具有重要意义。

将 74 场次洪水事件构建时间序列,采用 Mann-Kendall 检验法进行流域次洪水事件径流系数和平均含沙量变化趋势的判别。Mann-Kendall 检验法是由国际气象组织(WMO)推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法,是一种非参数统计检验方法,与参数统计检验法相比,该方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,而且计算也比较简单,是目前比较常用的趋势诊断方法^[20-21]。具体计算步骤^[21]如下:

1) 对于具有 n 个样本量的时间序列 x ,构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i (k=1, 2, \dots, n)$$

$$r_i = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} (j=1, 2, \dots, i) \quad (1)$$

式中: S_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数, $S_1=0$; r_i 为时间序列 x 的第 i 时刻数值与 j 时刻数值的大小判定值。

2) 在时间序列随机独立的假定下,定义统计量

$$U_k = \frac{(S_k - E(S_k))}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: U_k 为 Mann-Kendall 检验法的统计值(简称为 MK 值,下同), $U_1=0$; $E(S_k)$ 和 $\text{var}(S_k)$ 分别为 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立,具有相同连续分布时,它们可分别由下式计算:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

按时间序列逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,同时使 $V_k = -U_k, k=n, n-1, \dots, 1, V_1=0$ 。

3) 绘制 U_k 和 V_k 曲线图。

U_i 为标准正态分布,它是按时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列,给定显著性水平 α ,查正态分布表,若 $|U_i| > U_\alpha$,则表明序列存在明显的趋势变化。若 MK 值大于 0,则表明序列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当它们超过临界直线时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 U_k 和 V_k 2 条曲线出现交点,且交点在临界线之间,那么交点对应的时刻就是突变开始的时刻^[22]。

3 结果与分析

3.1 流域水沙变化特征

在 74 场次洪水事件中,64 场次洪水事件发生

在汛期,10 场发生在非汛期。对 74 场次洪水事件的降雨、径流和泥沙变量进行了描述统计分析,详见表 2。

表 2 吕二沟流域次洪水事件描述统计特征 ($n=74$)

Tab. 2 Descriptive statistics of flood events in Lu'ergou Watershed ($n=74$)

参量 Parameter/ 单位 Unit	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Std. Deviation
P/mm	6.7	144.7	38.8	24.6
D/min	40	4636	840	960
$I/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	0.9	36.8	5.8	5.7
$I_{30\text{max}}/(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	4.4	62.7	20.2	15.2
$P_{1\text{d}}/\text{mm}$	0	48.1	2.2	7.1
$P_{3\text{d}}/\text{mm}$	0	54.3	7.8	11.4
$P_{5\text{d}}/\text{mm}$	0	77.1	14.7	16.9
$P_{7\text{d}}/\text{mm}$	0	96.9	22.9	21.7
$P_{9\text{d}}/\text{mm}$	0	99.9	26.5	23.5
$P_{11\text{d}}/\text{mm}$	0	99.9	30.8	23.2
H/mm	0.4	32.8	4.7	6.0
$M_s/(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	34.2	3718.0	631.5	869.5
R_c	0.021	0.39	0.10	0.083
$S/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	46.3	329.0	129.1	69.7
$Q_{\text{max}}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	1.0	43.1	4.9	7.0
$S_{\text{max}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	71.0	531.0	234.5	113.5

统计分析得到吕二沟流域降雨产流的最小降雨量为 6.7 mm,这次洪水事件发生在 1985 年 5 月 18 日;最大次降雨量达到 144.7 mm,发生在 2005 年 6 月 30 日,但次降雨量超过 100 mm 的洪水事件总共只有 3 次,超过平均值 38.8 mm 的洪水事件也仅占所有事件的 35.1%。次洪水事件的降雨历时变化范围为 40~4 636 min,平均降雨历时为 840 min;降雨历时超过 1 000 min 的洪水事件仅有 20 场(27.0%),而降雨历时小于 540 min 的洪水事件达到了 38 场(51.4%)。次降雨平均降雨强度的最小值为 0.9 mm/h,洪水事件发生在 1984 年 7 月 9 日,降雨量为 57.7 mm,但降雨历时较长,达到 4 063 min;次降雨平均降雨强度的最大值达到 36.8 mm,洪水事件发生在 2001 年 7 月 24 日,降雨量为 24.5 mm,但降雨历时最短,只有 40 min。次降雨平均降雨强度超过 10 mm/h 的洪水事件仅有 13 场(17.6%),小于 5 mm/h 的洪水事件 46 场(62.2%)。前期降雨量的变化范围较大,前 1 天、3 天、5 天、7 天、9 天和 11 天降雨量序列的变差系数 C_v 分别为 3.18、1.47、1.14、0.95、0.89 和 0.75。

次洪水事件径流深的变化范围为 0.4~32.8

mm, 平均值为 4.7 mm, 径流深超过 10 mm 的洪水事件仅有 10 场 (13.5%), 小于 1 mm 的洪水事件 17 场 (23.0%)。径流系数的变化范围为 0.021 ~ 0.390, 平均值为 0.1, 径流系数大于 0.2 的洪水事件仅占 10 场 (13.5%), 小于 0.05 的洪水事件达到 24 场 (32.4%)。最小输沙模数为 34.2 t/km², 洪水事件发生在 2003 年 7 月 7 日; 最大输沙模数为 3 718.0 t/km², 发生在 2007 年 8 月 8 日; 输沙模数超过 1 000 t/km² 的洪水事件为 14 场 (18.9%), 由图 2 可知, 这 14 场洪水事件的累积降雨量、累积径流量和累积输沙量分别占总量的 30.5%、53.5% 和 63.7%。次洪水事件平均含沙量的变化范围虽然为 46.3 ~ 329.0 kg/m³, 平均值为 129.1 kg/m³, 但是变差系数 C_v 仅为 0.54, 表明吕二沟次洪水事件的平均含沙量变异程度较小。

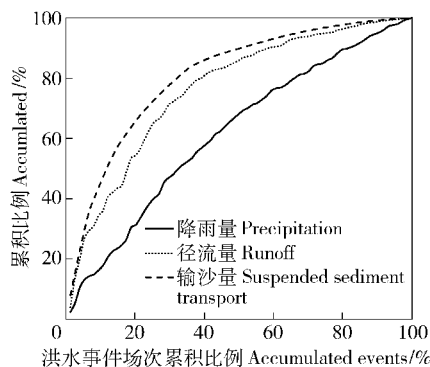


图2 次洪水事件降雨量、径流量和输沙量累积比例与次洪水事件场次累积比例的关系(洪水事件根据输沙量减小顺序排列)

Fig. 2 Percentage of accumulated precipitation, runoff and suspended sediment transport in relation to the percentage of events (Events were ranked decreasingly according to sediment delivery)

3.2 降雨-径流-输沙关系

研究构建了吕二沟流域降雨、径流和泥沙变量的皮尔逊相关系数矩阵, 详见表 3。可以看出: P 和 D 都与 H 、 M_s 、 R_c 具有显著的相关性 ($P < 0.01$), 表明 P 和 D 是吕二沟流域降雨产流和输沙的主要影响因素。次降雨量大于 50 mm 且降雨历时大于 1 000 min 的洪水事件共计 12 场 (16.2%), 但它们的径流量和输沙量分别占 74 场次洪水事件径流总量和输沙总量的 52.4% 和 45.2%。 I 与 H 在 $P < 0.05$ 水平上具有显著负相关性, 但与 M_s 和 R_c 都不具有显著相关性。 $I_{30\max}$ 与 H 、 M_s 和 R_c 都不具有显著相关性。但 I 和 $I_{30\max}$ 都与 S 和 S_{\max} 具有显著相关性 ($P < 0.01$), 表明降雨强度是吕二沟流域输沙的重

要影响因素。表 3 显示前期降雨量与流域的径流量和输沙量都不具有显著相关性, 但前期降雨量中 P_{3d} 和 P_{11d} 与 R_c 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, P_{7d} 和 P_{9d} 与 R_c 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, 其中 P_{7d} 与 R_c 相关性最显著, 相关系数最大, 为 0.324。这是因为前期降雨量可以表征流域前期土壤含水量的情况, 前期土壤含水量对黄土丘陵沟壑区土壤入渗能力具有显著影响^[23], 从而影响流域的降雨产流能力。降雨特征可由实测雨量资料来决定; 但由于土壤含水量的实测资料很少, 流域内前期水分条件很难获得, 因此目前通用前期降雨量来代表次洪水事件前的土壤含水量^[24]。

对吕二沟流域的次降雨量和径流深进行线性拟合 (图 3), 显示线性关系式的 F 检验值为 170.83, 显著性概率 $\text{Sig.} = 0.000 < 0.01$, 表明吕二沟流域次降雨量和径流深之间具有显著的线性拟合关系; R^2 为 0.51, 表明次降雨量能解释径流深变异的 51%。但图 3 显示 1984-08-01 洪水事件和 2003-09-29 洪水事件的数据点偏离线性关系线距离较大。2003-09-29 洪水事件径流深最大, 数据点偏离拟合线距离最大, 这可能是因为这场洪水事件的降雨历时最长, 达到了 4 636 min, 降雨量也较大, 达到了 85.0 mm。1984-08-01 洪水事件的降雨量和降雨历时虽然都小于 2003-09-29 洪水事件, 分别为 77.1 mm 和 1 318 min, 但是前 7 天降雨量较大, 达到了 47.2 mm。降雨所产生的径流量主要依赖于降雨开始时流域的初始土壤水分条件和降雨特征, 包括降雨量、历时和降雨强度。表 3 显示 P 和 D 都与 H 具有显著正相关性, 皮尔逊相关系数分别达到 0.747 和 0.730, 表明降雨量和降雨历时越大, 流域的产流量越多; P_{7d} 与 R_c 具有显著正相关性, 表明前期降雨量越大, 洪水事件的前期土壤水分越饱和, 流域的降雨产流能力越强。黄土丘陵沟壑区流域产流方式以超渗产流为主, 随着降雨量越大和降雨历时越长, 降雨前期使流域土壤水分达到饱和, 后期降雨量全部产流, 使流域径流量增大。

表 3 显示, H 与 M_s 之间的相关系数值最大, 达到 0.84, 表明 H 与 M_s 之间具有显著相关性 ($P < 0.01$)。用线性函数对 H 与 M_s 进行拟合 (图 4), F 值为 304.24, 显著性概率 $\text{Sig.} = 0.000 < 0.01$, 表明吕二沟流域径流深和输沙模数之间具有显著的线性拟合关系, R^2 达到 0.7, 表明径流深能解释输沙模数变异的 70%。 Q_{\max} 与 H 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, 与 R_c 、 M_s 、 S 和 S_{\max} 在 $P < 0.01$ 水平上显著相关,

表明 Q_{\max} 是流域产流输沙的重要影响因素,这是由于黄土丘陵沟壑区小流域坡面破碎、沟道比降大,较

大的洪峰流量能把一些不易侵蚀、搬运的物质破坏搬运出流域出口^[25]。

表 3 吕二沟流域降雨、径流和输沙变量皮尔逊相关系数矩阵 ($n = 74$)

Tab. 3 Pearson correlation matrix among rainfall, runoff and suspended sediment transport related variables in Lu'ergou Watershed ($n = 74$)

	P	D	I	$I_{30\max}$	P_{1d}	P_{3d}	P_{5d}	P_{7d}	P_{9d}	P_{11d}	H	M_s	R_c	S	Q_{\max}	S_{\max}
P	1															
D	0.749**	1														
I	-0.310**	-0.479**	1													
$I_{30\max}$	-0.162	-0.379**	0.512**	1												
P_{1d}	-0.049	0.033	-0.074	-0.100	1											
P_{3d}	-0.106	0.065	-0.139	-0.177	0.685**	1										
P_{5d}	-0.157	0.038	-0.173	-0.237*	0.356**	0.755**	1									
P_{7d}	-0.018	0.050	-0.210	-0.305**	0.215	0.553**	0.728**	1								
P_{9d}	-0.006	0.052	-0.205	-0.339**	0.201	0.498**	0.642**	0.960**	1							
P_{11d}	-0.024	0.040	-0.243*	-0.348**	0.158	0.435**	0.593**	0.887**	0.951**	1						
H	0.747**	0.730**	-0.256*	-0.153	-0.098	0.092	0.028	0.182	0.183	0.160	1					
M_s	0.608**	0.496**	-0.100	0.107	-0.072	0.053	-0.058	0.039	0.025	-0.016	0.840**	1				
R_c	0.317**	0.431**	-0.152	-0.043	-0.087	0.246*	0.211	0.324**	0.310**	0.276*	0.786**	0.741**	1			
S	-0.116	-0.254*	0.461**	0.403**	0.104	0.005	-0.175	-0.256*	-0.271*	-0.323**	-0.031	0.388**	0.117	1		
Q_{\max}	0.185	0.003	0.209	0.282*	0.011	-0.005	-0.097	-0.147	-0.153	-0.203	0.259*	0.615**	0.307**	0.634**	1	
S_{\max}	0.018	-0.087	0.324**	0.370**	0.031	-0.001	-0.152	-0.192	-0.204	-0.280*	0.148	0.498**	0.266*	0.848**	0.550**	1

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。Note: ** means that correlation is significant at the 0.01 level. * means that correlation is significant at the 0.05 level.

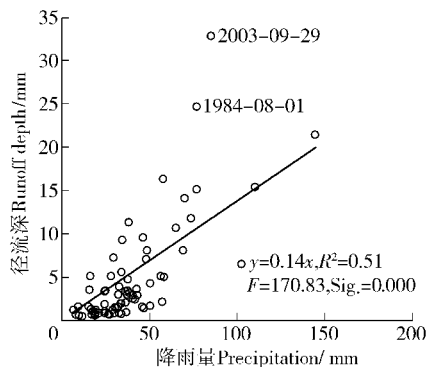


图 3 次洪水事件降雨-径流关系

Fig. 3 Event-based relationship between precipitation and runoff depth

3.3 径流系数变化趋势分析

次洪水事件的径流系数表征了流域的降雨量和径流量之间的转换关系,即流域降雨产流能力,径流系数的变化表现了流域降雨能力的变化。吕二沟流域 74 场次洪水事件的径流系数时间序列变化过程的 MK 检验结果见图 5。由图 5 可以看出在 1985 年 8 月 24 日发生的洪水事件是次洪水事件序列的突

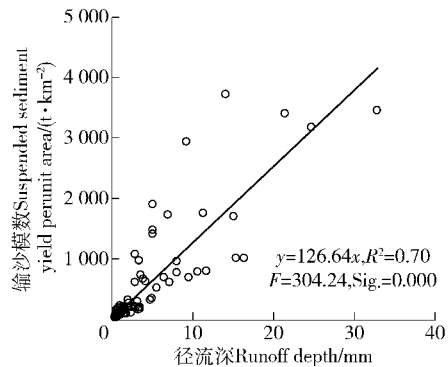


图 4 次洪水事件径流-输沙关系

Fig. 4 Event-based relationship between runoff depth and suspended sediment yield per unit area

变点,突变点之后的吕二沟径流系数 MK 值都小于 0,而且绝大部分 MK 值都超出了置信下限 ($\alpha = -1.96$),表明吕二沟流域径流系数呈显著减小趋势,流域降雨-径流关系发生显著变化。1985-08-24 洪水事件之前的 10 场次洪水事件的平均径流系数为 0.21,之后的 63 场次洪水事件平均径流系数为 0.087。表 3 显示 P 、 D 和 P_{7d} 与 R_c 显著相关,因此

以 R_C 为因变量,以 P 、 D 和 P_{7d} 为自变量,对吕二沟 74 场次洪水事件进行多元线性回归,得到的多元线性函数决定系数为 0.28,表明 P 、 D 和 P_{7d} 可以解释 R_C 变异的 28%。土地利用变化对流域降雨-径流关系的变化也具有显著影响,吕二沟流域在 1982—2010 年期间,植被覆盖度呈递增趋势。许多研究^[26-28]表明,林地、草地等植被覆盖类型土壤的入渗性能要高于其他土地利用类型;因此,吕二沟流域植被覆盖面积的增加提高了流域土壤入渗性能,从而降低了吕二沟流域降雨产流的能力,是径流系数呈减小趋势的主要影响因素。

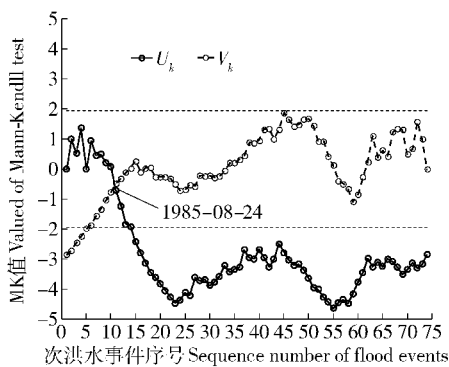


图 5 次洪水事件径流系数序列 Mann-Kendall 检验

Fig. 5 Mann-Kendall test for event-based runoff coefficients

3.4 平均含沙量变化趋势分析

次洪水事件平均含沙量表征了流域的径流-输沙关系,吕二沟流域次洪水事件平均含沙量时间序列变化过程的 MK 检验结果见图 6。

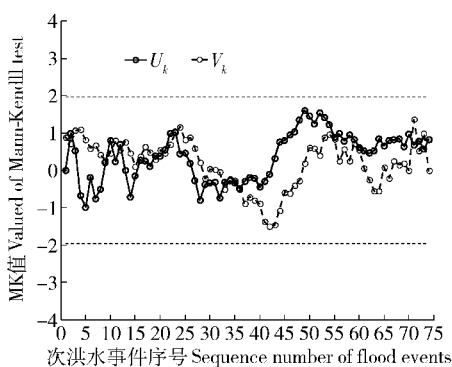


图 6 次洪水事件平均含沙量序列 Mann-Kendall 检验

Fig. 6 Mann-Kendall test for event-based mean suspended sediment concentrations

可以看出,次洪水事件平均含沙量序列的 MK 值都在置信变化区间范围内,表明流域次洪水事件平均含沙量变化趋势不显著,流域的径流-输沙关系没有发生显著变化。表 3 中显示 S 与 I 和 I_{30max} 显著相关,若以 S 为因变量, I 和 I_{30max} 为自变量进行多元线性回归,得到的多元线性函数决定系数仅为

0.25,表明 I 和 I_{30max} 只能解释平均含沙量变化的 25%。吕二沟流域治理措施以植物措施为主,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^[12]。虽然流域布设了一些水利水土保持工程措施,但这些工程措施大部分已不能继续发挥效益,对流域的水沙关系没有产生明显影响。

4 结论

1) 降雨量和降雨历时是吕二沟降雨产流和输沙的主要影响因素,流域的水土流失量主要由大雨量和长历时的降雨事件产生。前期降雨量中 P_{7d} 与径流系数的相关性最显著。吕二沟流域具有较好的水沙关系,径流量和输沙量的皮尔逊相关系数达到 0.84。

2) 1985 年 8 月 24 日发生的洪水事件是吕二沟流域次洪水事件径流系数序列的突变点,突变点之后流域径流系数呈显著减小趋势。土地利用变化尤其植被覆盖面积的增加是吕二沟流域降雨-径流关系变化的主要原因。

3) 在以植被措施为主的水土流失综合治理条件下,吕二沟流域的次洪水事件平均含沙量没有发生显著变化,表明植被措施没有显著影响吕二沟流域的水沙关系。

5 参考文献

- [1] Bi Huaxing, Liu Bin, Wu Jie, et al. Effects of precipitation and landuse on runoff during the past 50 years in a typical watershed in the Loess Plateau, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(3): 352-364
- [2] Li Zhi, Liu Wenzhao, Zhang Xunchang, et al. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377(1/2): 35-42
- [3] Xu Jiongxin. Variation in annual runoff of the Wudinghe River as influenced by climate change and human activity [J]. Quaternary International, 2011, 244(2): 230-237
- [4] Zhang Xiaoming, Cao Wenhong, Guo Qingchao, et al. Effect of landuse change on runoff and sediment yield at different watershed scales on the Loess Plateau [J]. International Journal of Sediment Research, 2010, 25(3): 283-293
- [5] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展 [J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278-285
- [6] 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
- [7] 陈月红. 黄土高原丘陵沟壑区典型流域侵蚀动力学过程研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008
- [8] 陈月红, 余新晓, 谢崇宝. 黄土高原吕二沟流域土地利用及降雨强度对径流泥沙影响初探 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 8-12
- [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] 姚文艺, 徐建华, 冉大川, 等. 黄河流域水沙变化情势分析与评价 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011
- [11] 龚时响, 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
- [12] 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
- [13] 据彤军, 刘普灵, 郑世清, 等. 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
- [14] 原翠萍, 李淑琴, 雷启祥, 等. 黄土丘陵沟壑区治理与非治理对比小流域侵蚀产流比较研究 [J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(6): 95-101
- [15] 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
- [16] 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
- [17] Zhao Wenwu, Fu Bojie, Meng Qinghua, et al. Effects of land-use pattern change on rainfall-runoff and runoff-sediment relations: a case study in Zichang watershed of the Loess Plateau of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(3): 436-442
- [18] 肖学年, 崔灵周, 李占斌. 黄土高原小流域水沙关系空间变异研究 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 140-142
- [19] 张琳玲, 王盛萍, 王建军, 等. 黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水土流失特征分析 [J]. 人民黄河, 2006, 28(12): 49-51
- [20] 李海光. 黄土高原吕二沟流域环境演变的生态水文响应 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011
- [21] 张建业, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究 [J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 2007: 63-66
- [23] 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 1-6
- [24] 王浩, 雷晓辉, 秦大庸, 等. 基于人类活动的流域产流模型构建 [J]. 资源科学, 2003, 25(6): 14-18
- [25] 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
- [26] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3/4): 247-258
- [27] 刘汗. 土壤入渗性能的降雨产流测量方法及其试验研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009
- [28] 赵鹏宇, 徐学选, 刘普灵, 等. 黄土丘陵区不同土地利用方式土壤入渗规律研究 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(1): 40-44

(责任编辑: 程 云)