

佳芦河流域林草覆被变化对产流机制的影响

胡彩虹, 冉 广, 荐圣洪

(郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001)

摘要: 以黄土高原佳芦河流域为研究区, 收集整理了 1966—2006 年的水文气象资料, 选取了 60 场洪水数据, 在分析其洪水过程线、产流特征值、产流机制等因素的基础上, 结合近 30 年来佳芦河流域林草覆被的变化情况, 综合分析了佳芦河流域林草覆被对流域产流机制变化的响应机理, 期望揭示黄河流域水沙减少的原因。结果表明, 近 30 年来, 佳芦河流域径流量骤减, 相比 60 年代, 2000 年以后佳芦河流域年平均径流量减少近 75.0%, 林草覆盖率从 8.0% 增加到 35.0%, 流域蓄水容量随植被盖度的增大呈上升趋势。3 个阶段 1966—1975 年、1976—1996 年及 1997—2006 年流域超渗产流为主的洪水场次所占比例分别为 72.8%, 65.0% 和 60.0%, 呈下降趋势; 1997—2006 年内混合及蓄满产流为主的洪水场次与 1966—1975 年相比分别增加 8.4% 和 4.3%。研究结果有助于深入认识黄河流域主要水土流失区的产水规律, 揭示黄河水量变化的机制, 为该区开展生态建设提供科学依据。

关键词: 黄土高原; 林草覆被; 流域蓄水容量; 产流机制变化

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0036-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.006

Effect of Forest and Grass Cover Change on Runoff Mechanism in Jialu River Basin

HU Caihong, RAN Guang, JIAN Shengqi

(School of Water Conservancy Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

Abstract: Taking the Jialu River Basin of the Loess Plateau as the study area, this study collected the hydrometeorological data from 1966 to 2006, meanwhile selected 60 flood data to analyze the flood process line, runoff characteristic value, and runoff generation mechanism. Combined with the changes of forest and grass vegetation in Jialu River Basin in the past 30 years, the response relationship between vegetation coverage and watershed runoff mechanism was analyzed comprehensively, which revealed the reason for the dramatical water and sediment reduction in the Yellow River Basin. The results showed that in the past 30 years, the volume of runoff and sediment in the Jialu River Basin decreased sharply. Compared with the 1960s, the annual average volume of runoff was abated by about 75.0%, the vegetation coverage rate increased from 8.0% to 35.0% and the watershed storage capacity of the basin had the same growth trend with the vegetation coverage. The proportions of floods dominated by runoff formation in excess of infiltration in the three stages(1966—1975, 1976—1996, 1997—2006) was 72.8%, 65.0% and 60.0%, respectively; however, compared with the period of 1966 to 1975, the proportions of floods dominated by runoff formation at the natural storage were increased by 8.4%, 4.3% respectively during 1997 to 2006. The research results would help to realize the runoff law of the main water and soil loss areas in the Yellow River Basin, reveal the mechanism of water changes in the Yellow River, and provide a scientific basis for ecological construction in the area.

Keywords: Loess Plateau; vegetation restoration; watershed storage capacity; change of runoff mechanism

土地退化是世界范围内最严重的生态问题之一^[1], 在人口和土地使用压力没有得到合理的安排

时, 可能发生荒漠化的现象。利用木本植物进行植被恢复是控制土地退化的重要途径之一, 可以控制水土

收稿日期: 2019-08-06

资助项目: 国家重点研发专项(2016YFC04024023); 国家自然科学基金项目(51979250, 31700370)

第一作者: 胡彩虹(1968—), 女, 博导, 教授, 主要从事水文学及水资源方面的教学与研究工作。E-mail: hucaihong@zzu.edu.cn

通信作者: 荐圣洪(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事生态水文学研究。E-mail: 439133317@qq.com

流失,改善水文循环。然而,木本植被将会消耗更多的水分。Kathleen 等^[2]通过对比 26 个流域的森林与草地的径流情况,发现在湿润地区,森林年平均径流量较草地减少了 44%,这种径流量的减少在中国的半干旱半湿润地区更为明显,可以达到 50%以上。

黄土高原经历了严重的水土流失、植被退化和沙漠化^[3]。因此,我国政府采取了广泛的植被重建工程来克服这些难题^[4]。黄土高原植被恢复的历史可以追溯到 20 世纪 70 年代。1999 年,为了减少坡耕地的水土流失,启动了“退耕还林”工程^[5],基于大量生态恢复工程的实施,黄土高原的生态环境得到了有效的改善。黄土高原是黄河流域的主要产流区,20 世纪 80 年代之后,黄河水量呈显著下降趋势^[6],针对这一问题,相关学者进行了大量的研究,但仍存在争议。刘晓燕等^[7]认为,黄土高原大面积植被恢复是黄河水量减少的主要原因;Zhao 等^[8]发现,气候变化对黄河中游径流减少的贡献率占到了 50%以上;姚文艺等^[9]研究表明,就黄河中游而言,人类活动的减水作用远大于降雨等自然因素的影响。

下垫面变化对流域产流过程产生影响的核心在于植被盖度,并对流域下渗率、流域蓄水容量以及产流前期影响雨量等造成影响^[10]。随着黄土高原水土保持生态修复工程的实施,流域植被盖度发生了较大的变化,迫切需要研究不同植被盖度下黄土高原的产流变化规律,揭示植被盖度对产流机制变化的作用。基于此,本研究以黄河中游佳芦河流域为研究区,在分析佳芦河流域植被盖度变化的基础上,以佳芦河流域长时间序列降雨数据以及场次洪水数据为依托,进行流域场次洪水的产流机制辨析,分析近 40 年来佳芦河流域产流机制变化情况,试图从产流机制角度寻求黄河水量减少的原因,为黄土高原生态建设的有效性以及制定区域可持续发展对策提供必要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

佳芦河流域是黄河中游河龙区间的一级支流,位于毛乌素沙漠南缘,河流发源于陕西榆林市双山乡断桥村,流经榆阳区、佳县,至木厂湾村汇入黄河(图 1)。流域面积 1 134 km²,河流全程 93 km。流域内共有 5 个雨量站,分别为双山、方家塌、王家砭、通秦寨、金明寺和申家湾水文站。其中,入黄控制站为申家湾水文站,控制面积 1 121 km²,流域多年平均降水量 375 mm(1966—2006 年),多年平均实测流量 0.61 亿 m³(1966—2006 年)^[11]。

1.2 基础数据与研究方法

1.2.1 数据收集 本研究收集整理了佳芦河流域各雨量站 1966—2006 年气象数据以及申家湾站的洪水

摘录数据,考虑到选取洪水的典型性和代表性^[12],选取典型洪水的标准为洪峰流量大于 100 m³/s,从 1966—2006 年间挑选出 60 场典型洪水。根据下垫面变化节点分为 3 个阶段进行分析:第 1 阶段为 1966—1975 年,第 2 阶段为 1976—1996 年,第 3 阶段为 1997—2006 年。同时收集 3 期 Landsat TM 遥感影像(1975 年、1996 年和 2006 年),空间分辨率 30 m×30 m。运用 ENVI 5.3 软件对流域 3 期遥感影像进行辐射定标和大气纠正等相关处理后,利用基于 CART 自动决策树分类的方法对流域进行土地利用类型分类,并提取各阶段的植被归一化指数(NDVI)以及植被盖度。

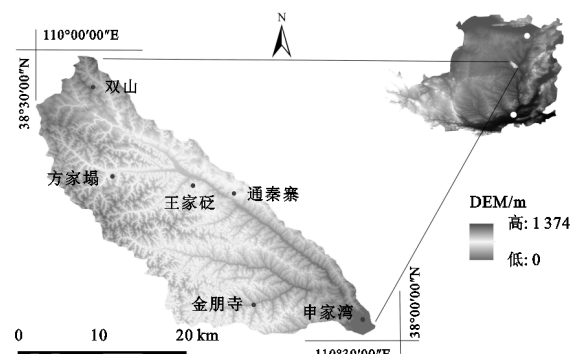


图 1 佳芦河流域相对位置

1.2.2 产流特征值计算方法

(1) 面降雨量计算。考虑到研究流域雨量站分布比较均匀,即利用算术平均法推求流域平均降雨量,降雨历时为有效历时,即不考虑间隔时间;平均降雨强度为面降雨量与降雨历时之间的比值;最大降雨强度为降雨过程中单位时段内降雨量的最大值^[13]。计算公式为:

$$\bar{P} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中: $\bar{P}$ 为流域时段内平均降雨量(mm); P_i 为 i 个站同时段降雨量(mm); n 为雨量站个数。

(2) 前期影响雨量计算。前期影响雨量反映一场降雨前流域土壤的干湿状况。本研究采用递推公式法推求场次洪水的前期影响雨量:

$$P_{a,t} = KP_{t-1} + K^2 P_{t-2} + \dots + K^n (P_{a,t-n} + P_{t-n}) \quad (2)$$

推求得前期影响雨量的计算通式:

$$P_{a,t+1} = K (P_{a,t} + P_t) \quad (3)$$

式中: P_{t-1} 、 P_{t-2} 、 $\dots$ 为 t 日前 1 日、前 2 日、 $\dots$ 的降雨量(mm); n 为影响本次径流的前期降雨天数,常取 15 天左右; $P_{a,t}$ 为第 t 日的前期影响雨量(mm); $P_{a,t+1}$ 为第 $t+1$ 日的前期影响雨量(mm); P_t 为第 t 日降雨量(mm); K 为土壤含水量的日消退系数,计算公式为:

$$K = 1 - \frac{E_m}{W_m} \quad (4)$$

式中: E_m 为流域蒸散发能力(mm); W_m 为流域最大蓄水容量(mm)。实际计算中,若 $P_a \geq W_m$, 令 $P_a = W_m$ 。

(3) 流域蓄水容量。流域蓄水容量(W_m)采用多场洪水逐次逼近计算推求,计算应选取能使流域土壤含水量达到饱和且产生较大洪水过程的降雨洪水场次,其推求过程为:

令 $W_{m,0} = I_m$, 其中损失量 $I_m = P - R$, P 为此次洪水的降雨量, R 为由此降雨所产生的径流总量, W_m 的计算过程为:

$$K_j = 1 - \frac{k_e \times E_0}{W_{m,j-1}}$$

(5)

$$W_{0,j} = \sum_0^n P_n \times K_j^n$$

(6)

$$W_{m,j} = W_{m,j-1} + W_{0,j}$$

(7)

式中: k_e 为流域蒸散发能力 E_m 与水面蒸发 E_0 的比值,在一个流域是一个固定值; P_n 为此次洪水的前 n 天的有效雨量(mm); n 为次幂; j 为迭代次数; $W_{m,1}$ 为第 1 次迭代的初值。经过多次迭代, W_m 趋于一个稳定值,即为流域蓄水容量。

表 1 影响流域产流的因子

序号	径流模式	发生的基本条件	影响总径流因子
1	Rs 型	包气带厚,土湿小,透水性差。雨强较大,包气带虽不厚,但久旱厚遇到大强度暴雨	$P、E、W_0、i$
2	Rs+Rss 型	相对不透水层浅,但下层很厚,上层透水性差,雨强相对较大;久旱后遇到大强度暴雨	$P、E、W_0、i$
3	Rs+Rg 型	包气带不厚,均值土壤,地面透水性一般,透水历时长	$P、E、W_0$
4	Rs+Rss+Rg 型	包气带不厚,存在相对不透水层,上层透水性极好,雨强小,降雨历时长	$P、E、W_0$
5	Rss+Rg 型	包气带不厚,但相对不透水层较深,上层极易透水,雨强相对不大,几乎不超过下渗容量	$P、E、W_0$

注:Rs 为地表径流;Rss 为壤中流;Rg 为地下径流;P 为降雨强度;E 为蒸发能力;W₀ 为前期影响雨量;i 为降雨强度。

流域的产流过程更为复杂,即便是属于同一类型的地区,也因其构造尺度和量级上的差异而出现径流生成过程和量级分配上的不同^[15]。流域的产流机制就是流域中各个单元产流模式的总组合。对于一个具体流域,各种模式所占比重是互不相同的,很难用简单的指标来量化。因此流域的产流模式需要从定量,定性及其他条件综合分析得出(表 2)。

表 2 流域产流机制综合判别指标

分析内容	蓄满产流	超渗产流
多年平均降雨量/mm	>1000	<400
平均径流系数	>0.4	<0.2
流量过程线的对称性	小	大
降雨强度对产流的影响	小	大
影响产流的因素	初始土湿、降水量	初始土湿、降水强度
土壤含水量	疏松、不易超渗	密实、易超渗
地下径流	比例大	比例小
降雨与产流特征的关系	与雨量关系密切	与雨强关系密切

对于每一场降雨的流量过程线,采用斜线法分割出壤中径流和地下基流,在综合分析降雨量、降雨强度、径

1.2.3 产流机制辨析 所谓产流机制是水分沿土层垂向运行过程中,供水与下渗矛盾在一定介质条件下的发展机理和过程^[13]。不同的供水和介质条件下,这一机理和过程就表现为不同的径流生成机制。目前所熟知的基本产流机制主要包括超渗地面径流、壤中流、饱和地面径流、地下径流产流机制 4 种。流域产流模式是由不同地质、地貌、土壤和植被单元所限定的不同产流机制所组成。因此,根据该研究区的包气带结构和降雨特性,可能出现 5 种类型的产流机制(表 1)。其中每种产流机制均反映了相应的径流成分组成。根据 Dunne 产流理论与产流模式之间的关系^[14],径流成分为地面径流(Rs)或者壤中流(Rss)的 Rs 型、Rs+Rss 型产流模式可以认为是超渗产流类型;有地下径流(Rg)生成的 Rs+Rg 型、Rs+Rss+Rg 型、Rss+Rg 型产流模式认为是蓄满产流类型。但是由于下垫面条件的复杂性及降雨时空分布的不均匀性会导致一场降雨中蓄满和超渗 2 种产流模式相互交织在一起,可认为这种模式是“混合产流”模式。

流系数、前期影响雨量、降雨径流相关关系等因素特点的基础上综合判断出相应的场次洪水产流模式。

以 19770804 场次洪水为例,进一步阐述场次洪水产流机制的判定过程(图 2)。该场洪水发生前 20 天内无降雨量,前期影响雨量很小,峰型为多峰,洪水前期以超渗产流为主,主要径流成分为地表径流,退水速率快,流量过程线呈陡涨陡落状;随着连续的降雨过程,土壤含水量不断增加,进而 B 点之后出现壤中流 Q_{ss} 、地下径流 Q_g 等径流成分(图 2),因汇水速度不同,后期洪水过程线呈现陡涨缓落状,产流机制由 Rs 产流机制为主转化为 Rs+Rss+Rg 产流机制为主,综合判断该场次洪水为混合产流模式。

2 结果与分析

2.1 降雨洪水特征分析

近 40 年,佳芦河流域年径流量呈下降趋势,1966—1975 年年径流变幅较大,但在 1975 年之后径流量急剧下降^[16],尤其是 2000 年之后,年平均径流

量由 1.052 亿 m^3 (1966—1975 年) 骤减至 0.224 亿 m^3 (2000—2006 年), 后者仅为前者的 21.3% (图 3)。

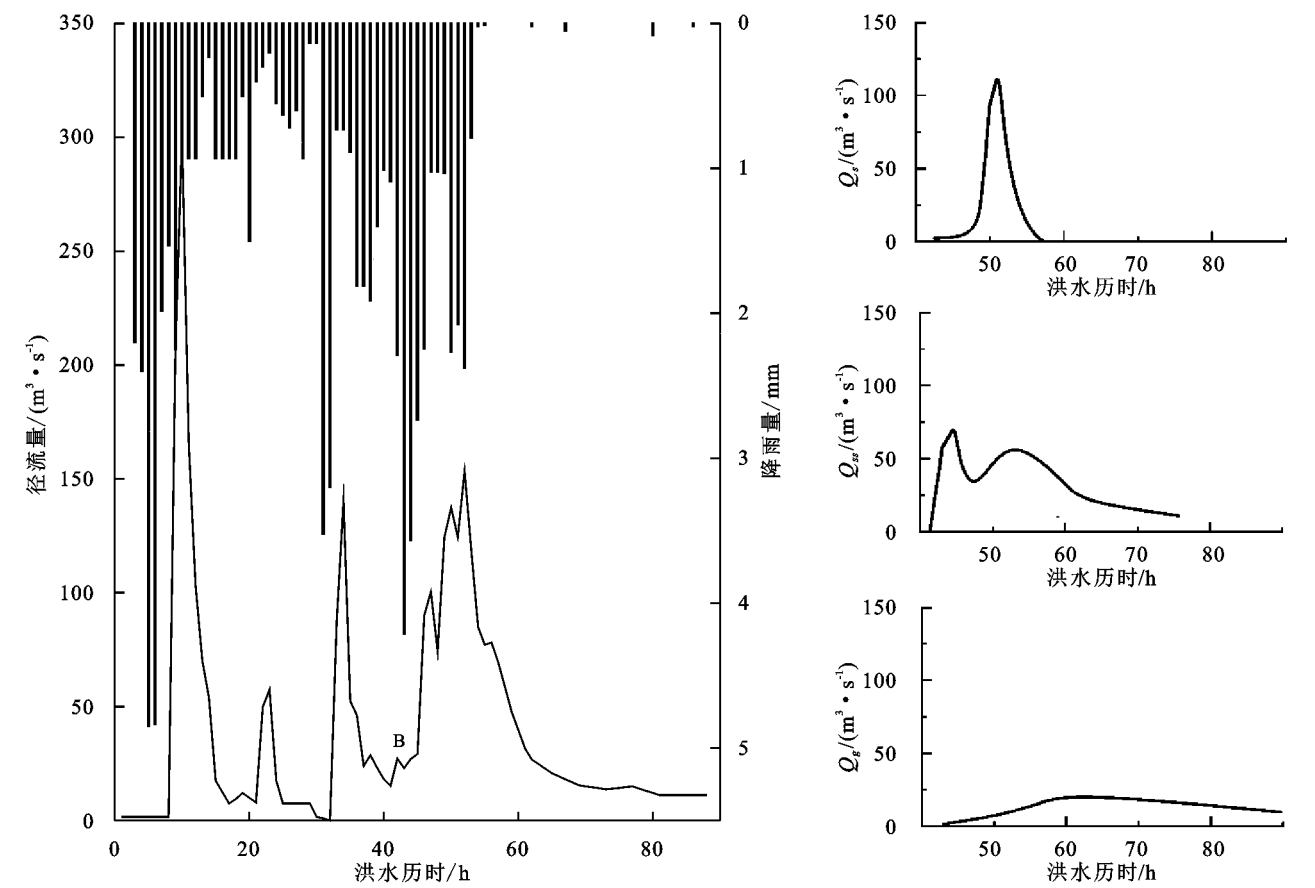


图 2 19770804 场次降雨洪水流量过程线

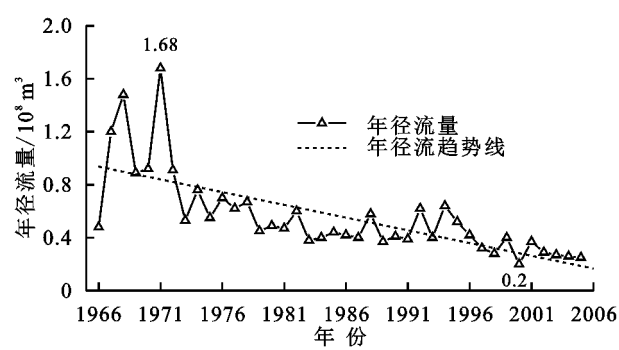


图 3 佳芦河流域年径流变化趋势

表 3 统计了佳芦河流域 60 场洪水的降雨洪水特征值,与 20 世纪 70 年代相比,近阶段洪峰流量及径流深明显减少,仅为前者的 25.7% 和 24.4%。面降雨量略微减少,相对较为稳定。3 个阶段的平均降雨历时分别为

16.50, 32.65, 39.00 h, 面降雨强度分别为 2.88, 1.74, 0.94 mm/h, 表明第 1 阶段产洪的降雨多为短历时高强度降雨,第 3 阶段多为长历时中小雨强降雨。

2.2 降雨径流相关分析

第 3 阶段(1997—2006 年)降雨径流相关关系最为密切(图 4a),表明第 3 阶段径流深对降雨量依赖性最大,且当发生同一量级降雨时,相比第 1 阶段,第 2, 3 阶段的产流量骤减。降雨强度与径流深呈显著的正相关关系,第 1 阶段(1966—1975 年)降雨强度与径流深的相关关系最好,表明第 1 阶段径流量对降雨强度的依赖性最大,第 3 阶段降雨强度与径流深相关性最弱,说明随着下垫面条件变化的影响,降雨强度对于径流深的影响有所减弱(图 4b)。

表 3 降雨洪水特征值统计

降雨阶段/年	洪水历时/h	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降雨 历时/h	面降 雨量/mm	平均雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	径流深/ mm	径流 系数
1966—1975	85.15	988.70	16.50	43.03	2.88	13.11	0.25
1976—1996	108.22	364.02	32.65	41.26	1.74	5.23	0.12
1997—2006	108.33	254.50	39.00	36.52	0.94	3.21	0.19

2.3 林草植被变化

1975 年流域植被覆盖率仅为 8%, 2006 年佳芦河流域林草植被覆盖率达到 35%, 1966—2006 年佳

芦河流域植被面积增长迅速, 增长率高达 25% (图 5)。这与佳芦河流域近年来大力开展退耕还林还草工程措施息息相关^[17]。

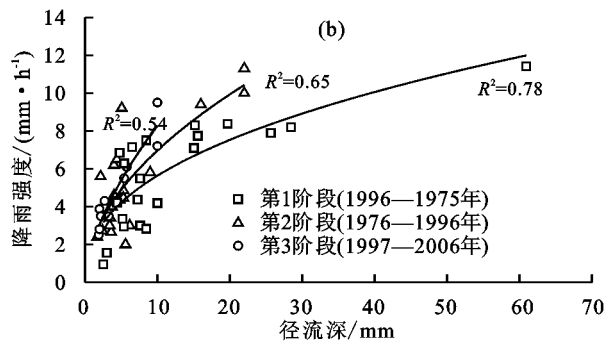
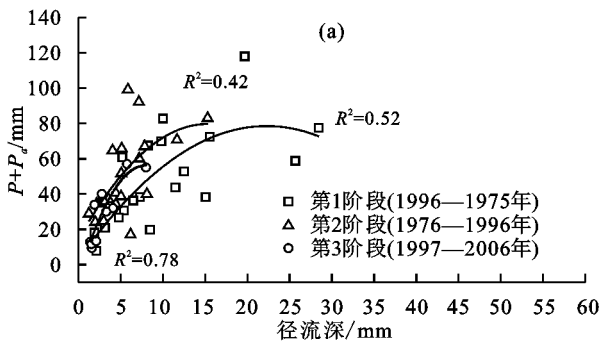


图 4 降雨径流相关关系

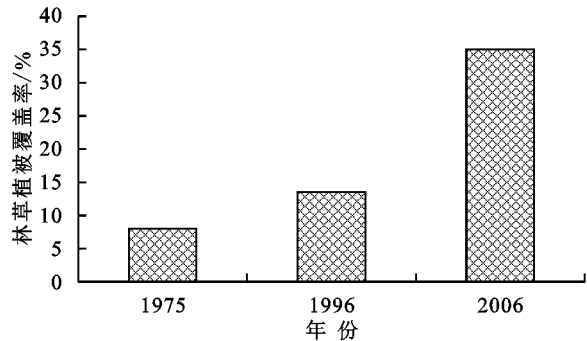


图 5 林草植被覆盖率年际变化

佳芦河流域 1975 年 8 月 29 日 NDVI 指数为 0~0.45,NDVI 值>0.3 所占比例为 12%,平均值为 0.102;1996 年 8 月 30 日 NDVI 指数>0.3 所占比例为 24%,平均值为 0.15;2006 年 8 月 30 日 NDVI 指数>0.3

所占比例为 41%,平均值为 0.22。3 个阶段 NDVI 指数的平均值呈增大趋势,年均增长率为 47%,这与杨波等^[18]的研究结果一致。由此可见,近年来佳芦河流域植被状况改善十分明显(图 6)。

2.4 产流机制辨析

针对场次流量过程线对洪水径流成分进行划分,发现佳芦河流域场次洪水径流组成成分为 4 种(表 4)。由表 4 可知,大多场次洪水的径流成分以 Rs 及 Rs+Rss 为主,各占总洪水场次的 33.3%;径流成分为 Rs+Rss+Rg 及 Rs+Rg 的场次洪水所占比例在逐阶段不断增加。总体而言,佳芦河流域每个阶段径流成份均以超渗地面径流为主,而地下径流产生的几率在不断增大。

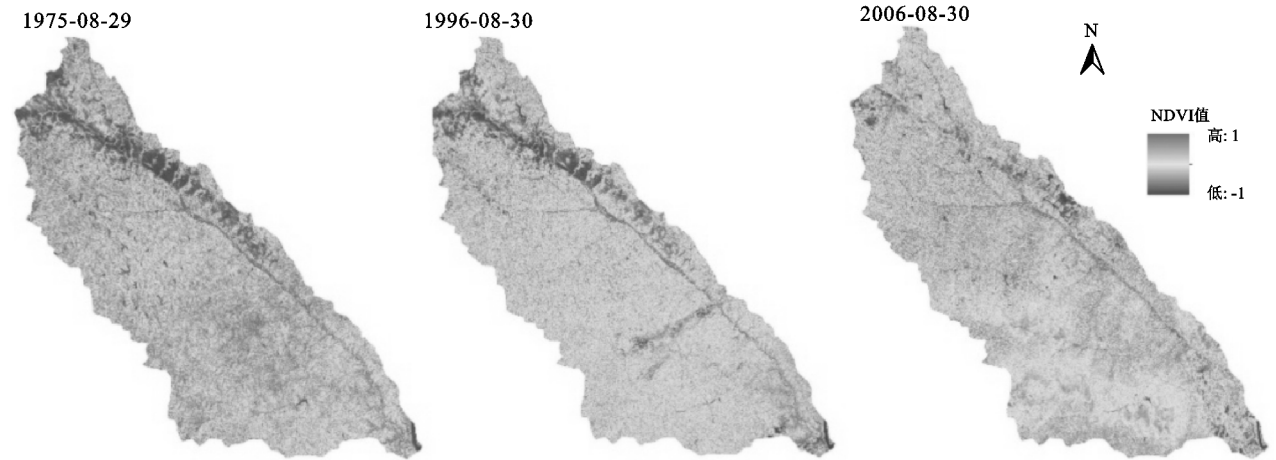


图 6 3 个阶段的 NDVI 分布变化

表 4 不同阶段场次洪水径流成分总计

降雨阶段/年	Rs	Rs+Rss	Rs+Rss+Rg	Rs+Rg	总计/(场次)
1966—1975	9(41.0%)	7(31.8%)	5(22.7%)	1(4.5%)	22
1976—1996	6(26.0%)	9(39.0%)	6(26.0%)	2(9.0%)	23
1997—2006	5(33.3%)	4(26.7%)	4(26.7%)	2(13.3%)	15
总计/(场次)	20(33.3%)	20(33.3%)	15(25.0%)	5(8.4%)	60

注:Rs 为地表径流;Rss 为壤中流;Rg 为地下径流;(%)表示同一阶段不同径流成分的场次洪水所占比重。

本研究综合分析每场洪水的产流类型(表 5)。整体来看,佳芦河流域仍以超渗产流为主,占总场次比例的 66.6%;3 个阶段超渗产流为主的洪水场次所占比例逐阶段降低,分别为 72.8%,65.0%,60.0%;

以混合产流为主的洪水场次以及蓄满产流为主的洪水场次比例分别以 18.2%,21.7%,26.6%和 9.0%,13.3%,13.3%逐阶段增加。1966—2006 年,佳芦河流域随着林草植被条件的变化,流域调蓄能力增强,使得场次洪水产流机制发生变化,超渗产流的比例逐渐减少,蓄满产流以及混合产流的比例逐渐增大。

流域产流机制的判别较场次洪水判别来说更为复杂,除了从降雨量、径流系数等指标判别以外,还需要考虑降雨及降雨强度与产流的相关关系、影响产流的因素、地下径流所占比例和土壤缺水量的大小等 8 个指标(表 6)。前 2 个阶段从 8 项指标来分析,佳芦河流域为典型超渗产流区;第 3 阶段(1997—2006

年)从径流系数、降雨对产流的影响及降雨与产流特征关系这 3 个指标来看,倾向于蓄满产流,其余 5 个指标倾向于超渗产流。在降雨量相对稳定的情况下,第 3 阶段流域植被状况改善明显,土壤入渗量增多,使得径流系数明显增大,地下径流占比有所增加,表明近阶段佳芦河流域仍以超渗产流为主,但发生蓄满、混合产流的几率在不断增加(表 6)。

表 6 3 个阶段综合判别指标统计结果

分析内容	第 1 阶段产流 (1966—1975 年)	第 2 阶段产流 (1976—1996 年)	第 3 阶段产流 (1997—2006 年)
多年平均降水量/mm	408.5	359.5	394.3
平均径流系数	0.19	0.12	0.22
流量过程线的对称性	大	大	较大
降雨强度对产流的影响	相关	较相关	相关性较小
影响产流的因素	初始土湿、降雨强度	初始土湿、降雨强度	初始土湿、降雨强度
缺水量	较大,不易蓄满	较大,不易蓄满	较大,不易蓄满
地下径流	比例小	比例小	比例较小
降雨与产流特征的关系	与雨强关系密切	与雨强关系较密切	与雨量关系较密切

2.5 林草植被变化对产流的响应

相同的降雨条件下,不同的下垫面条件会导致土壤的下渗率发生变化,从而影响土壤含水量的空间分布。林草植被作为下垫面条件影响产流的主要因素,具有较好的延缓径流^[19]、增加下渗时间的作用;同时植物根系生长发育过程中也可增加土壤中的大空隙,对土壤含水量有一定影响。随着近阶段植被覆盖率迅速增大,使得土壤入渗率不断增强,土壤蓄水能力不断增长,导致流域径流量明显减少(表 7),这与赵梦杰等^[20]试验研究中的所得出的结论一致。

表 7 不同时期流域场次降雨后的流域蓄水容量

降雨阶段/年	年均植被 覆盖率/%	径流深/ mm	流域蓄水 容量/mm
1966—1975	10.5	13.11	55.35
1976—1996	18.0	5.23	62.73
1997—2006	28.0	3.21	70.64

流域土壤蓄水量与场次降雨量呈正相关关系;对于同一量级的降雨来说,年平均植被覆盖率越大,场次降雨后土壤蓄水量越大。随着降雨量的不断增大,土壤蓄水量对于年平均植被覆盖率的变化更为敏感(图 7)。

众所周知,黄土高原地区包气带深度高达十几米深,通过一场降雨完成包气带蓄满进而发生蓄满产流并生成地下径流是几乎不可能实现的。但近些年,相关学者^[21-22]发现,在黄土高原地区,随着水土保持工作的不断推进,流域的植被覆盖条件迅速提高,使得流域的土壤入渗率增大,表层包气带更易蓄满产生地下径流,导致 Rs+Rss+Rg 型和 Rs+Rg 型产流模

表 5 不同阶段场次洪水产流模式统计

阶段/年	超渗产流	混合产流	蓄满产流	合计/(场次)
第 1 阶段 1966—1975	16(72.8%)	4(18.2%)	2(9.0%)	22
第 2 阶段 1976—1996	15(65.0%)	5(21.7%)	3(13.3%)	23
第 3 阶段 1997—2006	9(60.0%)	4(26.6%)	2(13.3%)	15
合计/(场次)	40(66.6%)	13(21.6%)	7(11.8%)	60

注:(%)表示同一阶段不同产流模式的场次洪水所占比重。

式出现的比例逐渐增加,进而流域内发生蓄满产流及混合产流的几率变大。

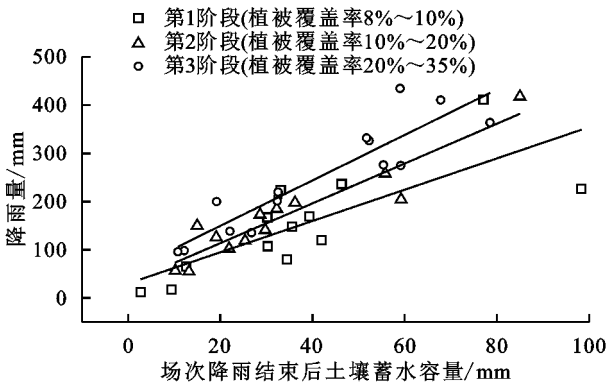


图 7 场次降雨总量与土壤蓄水容量的相关关系

3 结论与讨论

1975 年佳芦河流域植被覆盖率仅为 8%,2006 年林草植被覆盖率达到 35%^[14],林草状况改善十分显著,但同期径流量减少 75%。归一化植被指数(NDVI)呈不断增大趋势,NDVI 平均值年均增长率为 47%。流域蓄水容量随着植被盖度的增加逐渐增大,随着降雨量的不断增大,土壤蓄水容量对于植被盖度的变化更为敏感。由于土壤蓄水容量增加,导致流域内 Rs 型、Rs+Rss 型产流模式所占比例逐阶段不断减少;Rs+Rg 型、Rs+Rss+Rg 型产流模式所占比例分别以 4.5%,9%,13%和 22.7%,26%,26.7%逐阶段增大,即流域的产流机制发生改变。

佳芦河流域超渗产流为主的场次洪水所占比例不断减小,蓄满产流及混合产流为主的场次洪水比例不断增加。从综合判别指标分析来看,第 3 阶段(1998—2006

年)佳芦河流域发生蓄满产流的几率增大。

植被对流域产流的调控作用取决于植被的三要素,即植被盖度、枯落物厚度以及根系密度^[17]。因此本文的后续研究应以枯落物和根系密度作为研究对象,采用人工模拟产流试验,定量探究枯落物覆盖量及根系密度与产流特征值的相关关系,为全面揭示黄土高原主要产沙区植被对于流域产流机制影响提供坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] 江泽慧.全球变化背景下土地退化防治的挑战与创新发展[J].世界林业研究,2013,26(6):1-4.
- [2] Kathleen A F, Esteban G J, Robert B J. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy[J].Global Change Biology,2015,11(10):1565-1576.
- [3] 李国荣,李希来,陈文婷.黄河源区退化草地水土流失规律[J].水土保持学报,2017,31(5):51-55.
- [4] 张翀,王静,雷田旺.退耕还林工程以来黄土高原植被覆盖与地表湿润状况时空演变[J].干旱区研究,2018,35(6):1468-1476.
- [5] 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.
- [6] 赵阳,胡春宏,张晓明.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,38(21):112-119.
- [7] 刘晓燕,杨胜天,李晓宇.黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J].中国科学,2015,45(10):1052-1059.
- [8] Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: A case study of the Wei River basin, China[J].Hydrological Processes,2013,27(26):3852-3863.
- [9] 姚文艺,冉大川,陈江南.黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J].水科学进展,2013,24(5):607-616.
- [10] 李楠.下垫面变化条件下的黄土高原产流机制辨析研究[D].郑州:郑州大学,2018.
- [11] 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.
- [12] 李世明,马骏,许珂艳.黄河多沙粗沙区典型流域次暴雨产洪产沙预报研究[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [13] 宋孝玉.工程水文学[M].郑州:黄河水利出版社,2014.
- [14] 芮孝芳.产流模式的发现与发展[J].水利水电科技进展,2013,33(1):1-6.
- [15] 信忠保,许炯心,郑伟.气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J].中国科学(D 辑),2007,37(11):1504-1514.
- [16] 俞奇骏,张洪波,陈克宇,等.佳芦河流域水沙演变及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(3):151-156.
- [17] 刘晓燕.黄河近年水沙锐减成因[M].北京:科学出版社,2016.
- [18] 杨波,王全九,郝姗姗.佳芦河流域 1988—2013 年土壤侵蚀时空变化特征[J].水土保持学报,2017,31(5):87-93.
- [19] 张霞,李鹏,李占斌.不同植被格局下凸型坡径流流速时空变化及产沙研究[J].水土保持学报,2018,32(6):16-21.
- [20] 赵梦杰,姚文艺,王金花,等.植被覆盖度对黄土高原地区土壤入渗及产流影响的实验研究[J].中国水土保持,2015(6):41-43.
- [21] 廖建华,李丹勋,王兴奎,等.黄土高原侵蚀产沙与高含沙水流空间分异对比分析[J].自然资源学报,2010,25(1):100-111.
- [22] 李坤,姚文艺,肖培青,等.植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J].中国水土保持,2017(3):27-30.
- [23] 孙一源,高行方,余登苑.农业土壤力学[M].北京:农业出版社,1985:54-97.
- [24] 范昊明,张瑞芳,周丽丽,等.气候变化对东北黑土冻融作用与冻融侵蚀发生的影响分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(6):48-53.
- [25] 张海欧,解建仓,南海鹏,等.冻融交替对复配土壤团粒结构和有机质的交互作用[J].水土保持学报,2016,30(3):273-278.
- [26] 宁俊,王玉花,张聪敏.初始含水量及冻融循环对黄土微结构的影响[J].科学技术与工程,2018,18(5):285-290.
- [27] 苏谦,唐第甲,刘深.青藏斜坡黏土冻融循环物理力学性质试验[J].岩石力学与工程学报,2008,27(增刊 1):2990-2994.
- [28] Tian J F, Ye W J, Yang G S. The analysis of effects on shear strength characteristics of loess by moisture content changes and freeze-thaw circle[C]// Isrm Young Scholars Symposium on Rock Mechanics,2014:415-420.
- [29] 袁琳.蒙脱石的胀缩机理及改性技术研究[D].长沙:长沙理工大学,2007.
- [30] 蒋梅茵,杨德涌,熊毅.中国土壤胶体研究:VI II.五种主要土壤的粘粒矿物组成[J].土壤学报,1982,19(1):62-70,98.
- [31] 卜建清,王天亮.冻融及细粒含量对粗粒土力学性质影响的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(4):608-614.

(上接第 35 页)