

黄河小花间石山林区产汇流特征

郝芳华¹, 杨桂莲¹, 吴险峰¹, 刘昌明¹, 刘晓伟²

(1. 北京师范大学水科学研究所, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 黄河水利委员会水文局, 郑州 450004)

摘要: 产汇流机理研究是水文模拟的基础, 从实测水文资料出发进行深入分析是认识产汇流特性的有效手段。黄河小花间(小浪底—花园口间)洛河卢氏以上流域为典型的石山林区, 产汇流特性不同于黄河流域的一般地区。从选取的 43 场暴雨洪水资料分析得出: 该地区的暴雨空间分布不均匀, 存在着明显的暴雨中心, 产流机制和产流模式复杂。进一步分析变化环境下的降水径流特性后, 发现年径流量的变化主要受控于降水特性, 下垫面的改变和人类活动对年降水径流关系影响并不显著; 但对次洪而言, 该区生态保护和水土保持措施在一定程度上减少了产流能力, 提高了暴雨径流相关性。

关键词: 产汇流; 产流机制; 产流模式; 变化环境; 石山林; 小花间

中图分类号: P344 **文章编号:** 1000-0585(2004)02-0165-10

黄河流域特殊的地理环境和气候特征决定了黄河水文的复杂性, 加上近年来受气候变化和人类活动的影响, 黄河面临着水资源短缺、水灾害加剧、生态环境恶化等一系列问题, 黄河断流给中下游地区带来了严重的社会和环境问题, 黄河的水资源可再生能力受到威胁^[1], 目前在黄河流域还没有适用的水文模型, 要解决这些问题, 就必须进行水循环动力机制的深入研究, 尤其是进行产汇流机制研究^[2], 分析产汇流影响因子和驱动因子, 并分析其空间和时间变异, 探寻有效的降雨径流模拟方法。

与黄河流域产汇流研究关系密切的研究主要集中在黄河流域的降水变化特征、较大时间尺度的水汽循环和水汽在汛期的运移规律上; 在降雨截留过程方面的研究主要是为水保措施开展的室内和室外试验与资料分析, 赵鸿雁等通过对黄土高原上山杨林的水文效应研究, 发现林冠截留率年均为 15.6%, 枯枝落叶对径流流出时间的阻碍作用与自身厚度成正比, 与径流深度和坡度成反比^[3]; 降雨径流关系方面的研究有的属于个别流域的研究^[4], 一般集中在区域性暴雨洪水分析^[5]和降水特点对径流的影响^[6]; 对黄河流域产流模式的讨论主要集中在产流模式的辨识、归类 and 解释, 经验表明, 在黄河流域, 凡水土流失严重地区, 都是超渗产流, 凡水土流失轻微地区, 都是蓄满产流, 介于二者之间的过渡地区, 则超渗产流与蓄满产流两种模式并存^[7]。在黄河流域半干旱半湿润地区至今没有一个水文模型能取得较好的模拟效果, 主要原因是模型结构未能很好地反映产汇流的机制和缺乏与模型相匹配的水文基础资料^[8]。本文选择黄河流域典型石山林为研究对象, 旨在分析典型区产汇流特征及其变化环境下的水文效应规律。

收稿日期: 2003-04-27; 修订日期: 2003-08-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999043601); 国家自然科学基金委员会、水利部黄河水利委员会黄河联合研究基金项目(50239010)

作者简介: 郝芳华 (1963-), 女, 江苏连云港人, 教授, 主要从事水资源与水环境, 环境规划、评价与管理方面的研究。E-mail: fanghua@bnu.edu.cn

1 概况

黄河小花间(小浪底—花园口区间)是工程未控制区,洛河是这个区间最大的支流,是洪水的主要来源区之一,发源于陕西省华山南麓蓝田县境内,至河南省巩县境内汇入黄河,河道长 446.9 km,流域面积 18881km²(含伊河流域),流域形状狭长。流域地势西南高东北低,河流走向大致与黄河干流平行^[9]。研究区位于洛河上游卢氏水文站以上流域,地理坐标为 109°40′~110°10′E, 33°45′~34°30′N,流域面积 4623km²,河道长 196.3km,跨陕西和河南两省,该区为典型的石山林区,上游以石山为主,下游有一部分土石山。地势高峻,河沟密集,坡陡石多,地形复杂,切割严重,土地贫瘠。40%的地区坡度在 35°以上,30%的地区坡度在 25°~35°之间,20%的地区坡度在 6°~25°之间,坡度在 5°以下的地区仅占 10%。大部分地区海拔高度在 1200~2000m 之间,伏牛山主峰玉皇顶海拔 2211.6m,相对高度 500~1200m;沿河有许多面积较小的河谷平原,宽度 1000m 左右,海拔高度 600~1000m。西、南山区及崤山主脉多为砾质石渣土,土薄石厚,土层仅有 16~20cm,耕层浅,石渣比例大,透水性较好。森林草坡以棕壤、褐土为主,天然植被较好,除岩石裸露外,大部分是桦栎、杨、松、柏、椴、桐、楸等天然次生杂木林,林木覆盖率为 34.2%,郁闭度为 0.5~0.7,草本植物种类繁多,覆盖度中等^[9~10]。研究区有 33 个雨量站,出口断面站为卢氏水文站,河网结构和雨量站分布见图 1。根据 1971~2000 年资料统计,流域内多年平均年降水量为 720mm,多年平均年水面蒸发量为 966mm。

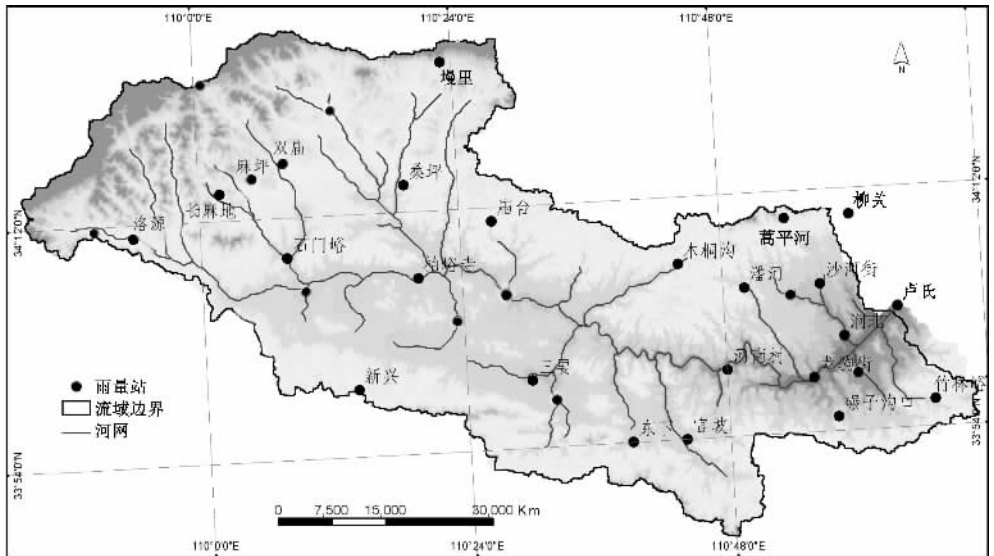


图 1 卢氏水文站控制流域水系及雨量站点位置图

Fig.1 Sketch of water system and rainfall stations of Luohe controlled by Lushi hydrologic station

2 降雨时空变化特征分析

研究区地处亚热带和暖温带的过渡地带,加之地处山区,海拔高,地形复杂,降雨强度大,因受下垫面山区地形影响,西北部较大,南部次之,洛河川最小。降水量年内分布

不均, 一般集中在 6~9 月, 占全年降雨量的 55~65%, 春秋次之, 冬季最少, 仅占 3.4%。受江淮切变线的影响, 夏秋常出现暴雨。从 1971~2000 年实测资料中选取 43 场暴雨进行分析, 暴雨一般出现在 5~10 月之间, 7~8 月占总数的 60~80%, 特大暴雨(如日降雨大于 150mm)多出现在 7 月中旬至 8 月上旬。

对选取的 43 场雨洪实测资料, 用 Arc view 的距离反比法进行空间插值, 获得了各场暴雨的空间分布, 经分析, 该区降雨分布不均匀, 存在着明显的暴雨中心。现用降雨量级分布来表示降雨空间分布的不均匀性。将研究区次降雨分为 11 个量级, 统计各次降雨不同量级的分布面积占流域总面积的百分比, 各次降水在空间分布上存在较大的差异, 大多数次降雨中, 总有 3~5 个量级雨量的分布。从平均值来看, 20~50mm 的次降雨量在该区分布最广, 占 32.1%, 50~75mm 的雨量次之, 0~10mm, 10~15mm, 15~20mm 小量级雨量和 175~200mm, 200~220mm, 220~250mm 大量级雨量也占到了该区流域面积的 21.6%。

为了进一步研究该区降雨空间分布的不均匀性, 现选用流域面雨量离差系数 C_v 、流域降雨不均匀系数 η 和流域最大与最小点降雨量的比值系数 α 三种指标来表示降雨空间分布的不均匀性^[11~12]。流域面雨量离差系数 C_v 可表示不同均值系列的离散程度, C_v 越接近 1, 离散程度越大, C_v 越接近 0, 离散程度越小; 流域降雨不均匀系数 η 反映了降雨的点面折减程度, η 越接近 1, 表示降雨越均匀; 流域最大与最小点降雨量的比值系数 α 反映了流域内两个极端值的倍数关系, 显示了降雨的不均匀程度, α 为 1 时, 表示流域内的降雨极均匀, α 越大, 表明降雨空间分布越不均匀。它们的计算公式如下:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

$$\eta = \bar{H} / H_{\max} \quad (2)$$

$$\alpha = H_{\max} / H_{\min} \quad (3)$$

式中, K_i 为 H_i 与 \bar{H} 的比值 (H_i 为流域内某一站的降雨量 (mm)); \bar{H} 为流域平均雨量 (mm); H_{\max} 为流域最大点降雨量 (mm); H_{\min} 为流域最小点降雨量 (mm)。

表 1 研究区次降雨空间分布不均匀性特征值

Tab. 1 Characteristic of uneven rainfall distribution in the study area

流域面积 (km ²)	雨量站数 (个)	降雨次数	C_v	η	α
4623	22	43	0.51	0.53	16.06

表 1 列出了计算的参数值, 可以看出研究区降雨分布的均匀性较差, 面雨量离差系数 C_v 值一般为 0.4~0.7, 平均为 0.51, 流域降雨不均匀系数 η 一般为 0.4~0.7, 平均为 0.53, 流域最大与最小点降雨量的比值系数 α 平均为 16.06。表 1 的结果仅就平均而言, 实际上还存在一些分布更不均匀的降雨。例如, 1980 年 6 月 29 日一次历时 6 h 的降雨, 面雨量 18.2mm, 潘河雨量站测得为 54.7mm, 而石门峪雨量站为 0.2mm。研究区降雨主要有两种类型: 一种是降雨历时短, 降雨强度大, 80% 的雨量常集中在 6~20h 内; 另一种是降雨历时长, 雨强不大, 常形成连阴雨, 降雨历时常达 3 天以上。

3 产流机制和模式初探

通过分析 1971~2000 年的 43 场雨洪资料, 得知该研究区降雨的径流效应比较复杂,

对同样的降雨,表现在量上,有大有小各不相同;表现在形上,一类峰形陡涨陡落,一类则平缓涨落,而另一类则有陡有缓,陡缓结合;在峰现时间上,一类雨止峰现,另一类则峰现时间滞后很多;在峰数量上,一类只有单峰,一类则有双峰,有时甚至有两个显峰和一个或几个隐峰,如图 2 所示。这些还只是表现在量与形上的差别,更重要的是质上即径流成分的差别,也正是存在着质上的差别,才在峰形上表现出各自的特征和差异。只有从径流形成的成因和途径揭示其机理才能认识现象的本质和解释它们^[13~15]。

3.1 产流机制

研究区为半湿润石山林区,植被较好,土壤下渗率较高,有地下水补给。为了进一步认识该区的产流特点,需要从流量过程线的水源补给进行分析论证^[16]。该研究区典型的流量过程线如图 2 (c) 和 (f) 所示,呈陡涨缓落形,单峰降雨形成单峰流量过程,由大面积上产生的饱和坡面流形成,地面径流过程覆盖在壤中流及地下径流过程之上,成为单峰形。地下水径流补给较丰富,导致退水过程线拖得很长,落洪长达 3 天以上。

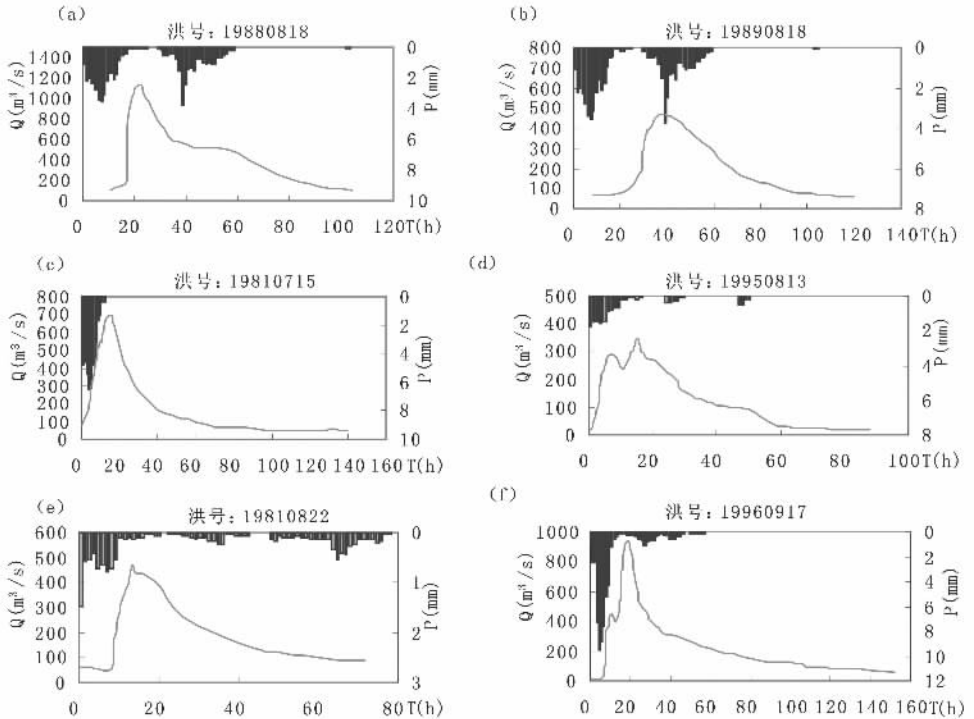


图 2 研究区降雨径流过程线

Fig. 2 Rainfall-runoff hydrograph in the study area

该研究区的产流机制并非固定不变,而是随着降雨强度和降雨历时发生转化。若降雨强度较小,只产生地下径流或壤中流;如遇大强度暴雨,则产生超渗地面径流。较短历时的小暴雨,可能产生壤中流或地下径流,也可能不产流;而较长历时的小暴雨,则可能产生饱和地面径流。图 2(e)和(f)是该研究区实测的两次暴雨洪水过程线,其中图 2(f)中的洪水过程显得主峰部分尖瘦而基本对称,相应的降雨历时为 12h,最大雨强为 9.6mm/h,且前期湿润;图 2(e)的洪水过程线低平,相应的降雨历时长达 68h,最大雨强只有 1.4mm/h。可以得出,该地区短历时高强度暴雨将形成以超渗地面径流为主的洪水过程

线, 而长历时低强度暴雨将形成以壤中流和地下径流为主的洪水过程线。

3.2 产流模式

由于该研究区不同的包气带结构和降雨特性, 存在三类模式^[17~20], 如表 2 所示。

分析 43 次洪水过程线发现, 卢氏以上流域多年的洪水径流过程为陡涨缓落单峰形, 在数量上占优势的产流模式是 A 主导型, 它决定了该流域的产流机制和产流特征, 同时还存在 B 型和 C 型, 其发生是偶然的, 非主导的。但 B、C 模式也体现了在特定降雨分布及前期湿润条件下, 该流域中某些局部的、极小山坡流域单元的产流特征。A 模式是经典的“超渗产流”, 而 C 则是“蓄满产流”, 可见该区以超渗产流为主, 在特定降雨分布及前期湿润条件下, 也会发生蓄满产流。

表 2 总径流的不同组成及其发生条件和影响因素

Tab. 2 Different components, forming conditions and effects of runoff in the study area

模式	总径流组成	发生的基本条件	影响因素
A	超渗地面径流、地下径流	包气带不厚, 均质土壤, 地面透水性一般, 久旱后遇到大强度暴雨	P, E, W _{bB}
B	壤中流、地下径流	包气带不厚, 但相对不透水层较深, 上层极易透水, 下层透水性很差, 降雨强度几乎不可能超过地面下渗能力	P, E, W _{bB}
C	饱和地面径流、壤中流、地下径流	包气带不厚, 存在相对不透水层, 地面极易透水, 下层次之, 降雨强度小, 降雨历时长	P, E, W _{bB}

注: W_{bB}为降雨开始时包气带下层的土壤含水量

4 水源划分及径流成分分割

实测流量资料往往各次洪水首尾连续相接, 要从中取得次洪总产流量 R_0 及流量过程 $Q \sim t$, 首先需要对实测 $Q \sim t$ 进行分划。由于补给河川径流的各种水源流速不同, 汇流历时不等, 其中坡面流及大部分壤中流雨后很快汇集至出口断面, 形成 $Q \sim t$ 的主体部分。地下径流则缓慢流出, 并常延续至后继洪水来临后。可见, 分划 $Q \sim t$ 主要是延伸地下径流的退水段。同时, 由于流速不同, 汇流计算中需划分水源。通常把汇流速度相近的地面径流和壤中流划在一起, 称为直接径流, 而把流量过程分割为直接径流 Q_d 与地下径流 Q_g 两部分, 这样做也需要依据地下水的退水规律, 所以流量过程线分析着重在地下退水段。退水曲线采用指数消退方程:

$$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{K}} \quad (4)$$

式(4)中, Q_0 和 Q_t 为退水曲线上相隔 t 时间始、末的流量, K 为蓄泄系数, 采用相邻时段流量相关法 $Q_{t+1} = f(Q_t)$ 求出系数 K , $R_0 = ABGDE + K(DE - BC)$, 从而计算次洪总产流量 R_0 。划分水源的关键点是要找到退水曲线上壤中流终止即地下径流的始退点。可采用斜分割法, 如图 3 所示, ABE 所包围面积为直接径流, 割去基流 GBF , 则次洪产流量 $R = R_0 - GBF$ 。地下水分割后, 可计算得直接径流产流量 Q_d , 则 $R_g = R - R_d$ 。统计 43 次雨洪可得, 研究区 K 为 69h, 次洪径流系数平均值为 0.36, 直接径

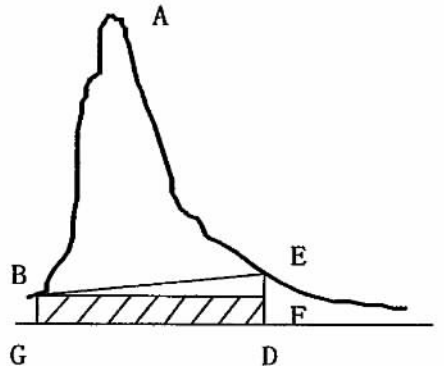


图 3 地下径流分割图

Fig. 3 Divided groundwater flow

流占次洪径流量的 74.7%。

5 流域汇流特性分析

汇流时间和滞时是反映该研究区响应时间特性的重要参数^[21]。基于降雨过程线和径流过程线定义,流域的汇流时间是指净雨质心和直接径流过程的退水拐点的时间,可直接由实测资料算出。滞时指净雨质心到洪峰出现时间的时距^[22~23],同样可由实测资料算出^[24]。从 43 次雨洪实测资料中统计出该流域汇流时间为 18.0h,洪水滞时为 13.7h。

表 3 汇流时间特性参数不均匀性特征值

Tab. 3 Characteristics of uneven routing time in the study area

	n	C_v	η	α
汇流时间	43	0.30	0.64	18.67
滞 时	43	0.10	0.51	20.77

注: n 为雨洪总次数

降雨特性是影响汇流时间和滞时的重要因素。降雨特性包括降雨的时空分配、降雨历时、暴雨走向等。该区由于降雨的时空分布不均匀,汇流时间和滞时存在着较大的差异。可仿用降雨空间分布不均匀性指标来表示。表 3 计算了汇流时间和滞时的不均匀性参数。

6 变化环境下的降雨径流特性分析

6.1 土地覆被变化和气候变化

研究区地势高峻,河网密度大,切割深,坡陡石多,地形复杂,人烟稀少,居住分散。历史上,森林茂密,植被覆盖率高,年降水量比较均匀。但是其后,由于人类的活动,该地区的自然环境有了一定的改变。主要表现在,1976 年前的十几年,乱砍滥伐、毁林开荒等行为,严重的破坏了该地区的森林和植被,1978 年统计,卢氏地区的森林覆盖率由解放初期的 50% 下降到 24%,水土严重流失。此后,特别是 1982 年以来,该地区开展了大规模的水土保持工作,开展了水保造林、水保种草、坡耕地改梯田、修建拦蓄水工程、小流域综合治理等措施。大力发展林业,1979 年开始在大部分面积上飞播造林。一系列的措施,使该地区的森林植被得到了显著的恢复,目前森林和草地覆盖率已达到 70% 以上。

表 4 统计了 2000 年该地区的土地利用情况。根据前述环境变化分析,在资料范围内,将 1971~1984 年作为一个时间段(下称第一时段),这个时期森林植被较差,水土流失较严重;1985 年以来作为另一个时间段(下称第二时段),这个时期森林植被恢复较好。

表 4 研究区 2000 年土地利用类型统计

Tab. 4 Land use classes statistics of the study area in 2000

土地利用类型	耕地	林地	草地	水库滩地	居民建设用地	裸地	合计
占比例 (%)	25.2	45.8	27.3	1.1	0.5	0.1	100.0

图 4 (a) 为 1953 年以来年平均气温的累积距平值变化趋势,从年均气温的变化趋势看,1953 年到 1958 年处于气温下降的阶段,1958 到 1966 年处于回升阶段,1966 到 1979 年处于相对平稳时期,气温均高于平均值,1979 年到 1993 年处于持续下降阶段,此后开始回升。

6.2 年蒸发趋势分析

图 4 (b) 为 1959 年以来的年水面蒸发量 (蒸发皿观测值) 的累积距平值变化趋势, 从年蒸发的累积距平值变化趋势图看出, 规律性很强, 即从 1959 年到 1973 年处于不断增加的阶段, 而此后一直到 1983 年处于相对稳定的时期, 1983 年以后则持续地下降。即经历了持续上升、稳定和持续下降的阶段。对比年均温的变化趋势, 总体上具有相似性, 但在年份上并不对应。也就是说, 气温是影响蒸发的因素之一, 但不是决定性的^[25]。

6.3 年降水径流特性

图 5 (a) 是年降水和汛期 (6~9 月) 降水的累积距平值变化趋势图。可以看出, 年降水从 1971 年到 1978 年, 负累积距平值持续增加, 这一时期降雨处于偏少的时期, 从 1978 年到 1984 年, 为降水偏丰时期, 而 1985 年以来则又处于少雨时期。汛期降水和年降水的趋势基本一致。图 5 (b) 则是年径流深和汛期径流深的累积距平值变化趋势。径流深是降水的最重要的响应, 降水是决定径流深的主导因子, 比较图 5 (a) 和 (b) 可以看出, 径流深的变化趋势与降水的变化趋势基本一致。汛期径流深与年径流深相比, 在累积距平值为负值的阶段变化幅度比年径流深大, 而在累积距平值为正值的阶段则幅度明显变小, 反映了汛期径流深对枯水的反应更敏感。

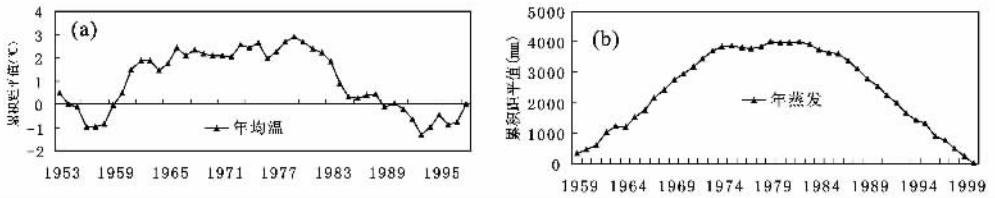


图 4 年平均气温和年水面蒸发量累积距平值变化趋势

Fig. 4 Mass departures of mean annual temperature and annual evaporation yield from water surface

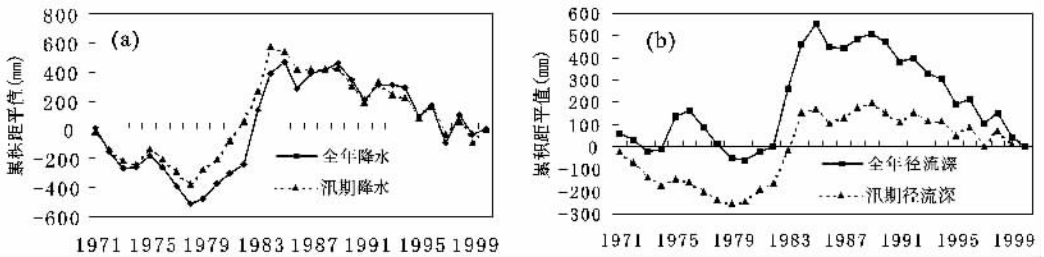


图 5 年降水、汛期降水以及年径流、汛期径流累积距平值变化趋势

Fig. 5 Mass departures of annual, flood-period rainfall and annual, flood-period runoff

图 6 (a) 为年径流系数的变化趋势, 可以看出年径流系数总体呈下降趋势, 与降水的变化趋势是一致的。图 7 (a) 为年降水径流关系图, 划分为两个时段 (1971~1984 年, 1985~2000 年), 两个时段的降水径流关系也基本一致。这两个图说明了径流系数主要受降水的影响, 其它因素对径流系数的影响并不明显。

6.4 次洪径流特性

从实测资料中摘录了 43 场雨洪资料 (1971~2000 年) 进行了次洪的径流特性分析。图 6 (b) 为次洪径流系数变化趋势图, 其中洪水编号按时间顺序编排。与年径流系数的

变化趋势相比, 次洪的径流系数变化略有下降的趋势, 但并不明显。图 7 (b) 是两个时段的次暴雨径流关系图, 可以看出, 在 1985~2000 年期间, 点据相对比较集中, 暴雨径流关系规律性强, 而 1985 年前点据非常的散乱, 很难找到一条曲线拟合。同时也可以看出, 第一时段的点据大部分在第二个时段拟合曲线的右侧, 说明两个时段的暴雨产流特性有差别, 第一个时段的产流量要大于第二时段, 且受除雨量外的其它因素影响较大^[26]。

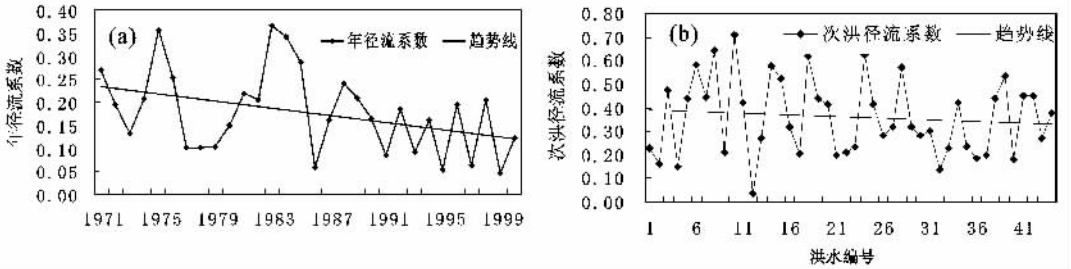


图 6 年径流系数和次洪径流系数变化趋势图

Fig. 6 Trends of annual runoff and flood-runoff coefficient

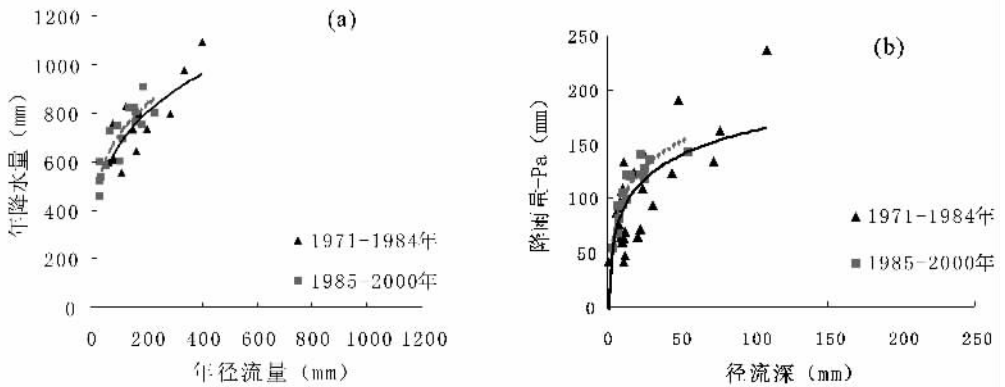


图 7 年降水径流关系和暴雨径流关系图

Fig. 7 Correlations of annual rainfall-runoff and storm-runoff

7 结 论

从上面实测资料的分析, 可得出以下初步结论:

(1) 研究区暴雨空间分布不均匀, 存在明显的暴雨中心, 流域最大与最小点降雨量的比值可达 16 以上; 在时间分布上存在两种典型, 一种是短历时高强度暴雨, 另一种是长历时低强度暴雨;

(2) 产流机制比较复杂, 短历时高强度暴雨形成了超渗地面径流为主, 长历时低强度暴雨形成了以壤中流和地下径流为主的洪水过程; 具有蓄满和超渗的特征。次洪径流系数平均值为 0.36, 直接径流占总径流的 74.7%, 流域平均汇流时间为 18h, 滞时为 13.7h;

(3) 年蒸发与年气温的总体变化趋势具有相似性, 气温是影响蒸发的主要因素之一, 蒸发的变化趋势还受其它多种因素的综合作用; 80 年代中期以来降水处于相对少雨期, 年径流量呈下降趋势, 年径流量的变化主要受控于降水特性, 径流系数主要受降水的影

响, 下垫面的改变和人类活动对年降水径流关系影响并不显著, 这与长江梭磨河流域的研究结果相似^[27];

(4) 对暴雨径流而言, 80 年代中期以来, 一系列的水土保持和生态保护措施, 增加了森林植被的覆盖度, 提高了拦蓄水和固土能力, 使降雨的截留增大, 在一定程度上减少了产流能力, 提高了暴雨径流相关性。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 张士锋. 黄河若干水文问题研究的回顾与展望. 见: 刘昌明, 等. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 22~33.
- [2] 刘苏峡, 张士锋, 刘昌明, 黄河流域水循环研究的若干进展和展望. 地理研究, 2001, 20(3): 257~267.
- [3] 赵鸿雁, 等. 山杨林的水文水保作用研究. 人民黄河, 1994, (4): 27~29.
- [4] 赵卫民, 郝芳华. 黄河若干水文问题研究的回顾与展望. 见: 刘昌明, 等. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究和进展. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. 58~82.
- [5] 赵咸榕. 金堤河流域降雨径流关系探讨. 人民黄河, 1992, (3): 10~14.
- [6] 冯相明, 等. 黄河河口镇至吴堡区间区域性暴雨洪水分析. 人民黄河, 1991, (5): 13~16.
- [7] 王云璋, 等. 近十年渭河流域降水特点及其对径流影响的初步分析. 人民黄河, 1998, (10): 4~6.
- [8] 李琪. 全国水文预报技术竞赛参赛流域水文模型分析. 水科学进展, 1998, (6): 191~195.
- [9] 郭建民, 郑金亮, 主编. 伊洛河志. 北京: 中国科学技术出版社, 1995.
- [10] 卢氏县水利志编纂领导小组 编. 卢氏县水利志. 西安: 陕西人民出版社, 2001.
- [11] 焦菊英, 王万忠, 等. 黄土高原暴雨空间分布的不均性及点面关系. 水科学进展, 1999, 10(2): 165~169.
- [12] 焦菊英, 王万忠. 黄土高原降雨空间分布的不均性研究. 水文, 1997, (4): 20~24.
- [13] Corradini, Corrado, Morbidelli, *et al.* On the interaction between infiltration and Hortonian runoff. Journal of Hydrology, 1998, 204: 52~67.
- [14] Gautam M R, Watanable W, Saegusa H. Runoff analysis in humid forest catchment with artificial neural network. Journal of Hydrology, 2000, 235: 117~136.
- [15] Saghafian, Bahram, Julien, *et al.* Runoff hydrograph simulation based on time variable isochrone technique. Journal of Hydrology, 2002, 261: 193~203.
- [16] 赵人俊. 降雨径流流域模型中的水源划分问题. 水文, 1981, (3): 20~24.
- [17] 于维忠. 论流域产流. 水利学报, 1985, (2): 1~11.
- [18] 芮孝芳. 产汇流理论. 北京: 水利电力出版社, 1995. 34~50.
- [19] 芮孝芳. 关于降雨产流机制的几个问题的讨论. 水利学报, 1996, (9): 22~26.
- [20] 芮孝芳, 姜广斌. 产流理论与计算方法的若干进展及评述. 水文, 1997, (4): 16~20.
- [21] Schulz E F, Lopez O G. Determination of urban response time. Hydrology Paper no. 71, Colorado State University, Fort Collins, 1974.
- [22] Taylor A B, Schwarz H E. United hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. Transactions of the American Geophysical Union, 1952, 33: 235~246.
- [23] Eagleson P S. Unit hydrograph characteristics for sewered areas. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of the Civil Engineers, 1962, 88(HY2): 1~25.
- [24] Vijay P S. 水文系统 流域模拟. 赵卫民等译. 郑州: 黄河水利出版社, 2000. 130~149.
- [25] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对气候变化的响应. 地理研究, 1998, 17(4): 435~443.
- [26] 何进知, 李舒宝, 等. 森林植被对流域产汇流机制的影响效应分析. 水文, 2000, (2): 11~13.
- [27] 陈军锋, 张明. 梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对径流影响的模拟研究. 地理研究, 2003, 22(1): 1~6.

Analysis of rainfall-runoff in Xiaohua tor-forest district of the Yellow River Basin

HAO Fang-hua¹, YANG Gui-lian¹, WU Xian-feng¹, LIU Chang-ming¹, LIU Xiao-wei²

(1. Institute of Water Sciences, Beijing Normal University; Key Laboratory for Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Beijing 100875, China;

2. The Bureau of Hydrology, YRCC, Zhengzhou 450004, China;)

Abstract: Research of runoff generation and routing mechanism is the foundation of hydrological simulations. Further analysis based on hydrological data is an effective means. Lushi basin (4623km²) located above Luohe in the middle Yellow River is a typical tor-forest area. Its runoff generation and routing characteristics are different from the others'. To further research the asymmetry of precipitation spatial distribution, the following three indexes can be used: dispersion coefficient of basin precipitation (C_V), asymmetry coefficient of basin precipitation (η), and ratio of the maximum and the minimum precipitation in basin area (α). To separate runoff components and show changes of air temperature, evaporation, precipitation, runoff and rainfall-runoff coefficient, a hydrograph recession curve displacement method and mass departure method were respectively used. The analysis of the selected 43 rainfall-runoff data from 1971 to 2000 revealed that the region's rainfall spatial distribution is very asymmetric with the existence of a distinctive a storm center; its mean dispersion coefficient of basin precipitation (C_V) is 0.51, mean asymmetry coefficient of basin precipitation (η) 0.53 and mean ratio of the maximum and the minimum precipitation in basin area (α) 16.06. Its routing mechanism and modes are very complicated, including over-infiltration and over-fall patterns. The annual direct flow accounts for 74.7% of the total, routing time is 18.0h and lag time 13.7h. An in-depth analysis of routing characteristics on the variational conditions resulted in important conclusions: changes of annual runoff yield and rainfall-runoff coefficient were resulted from rainfall characteristics; changes of underlying surface and human activities did not cause prominent effect on the relation of rainfall-runoff; while to flood, biological protection and water and soil conservation measures increased the cover degree of vegetation and forest, improved interception and soil fixation ability, reduced runoff generation capacity and improved the correlation of flood-runoff in the study area, to a certain extent.

Key words: runoff generation and routing; mechanism of runoff generation; various components of runoff; variable conditions; tor-forest area; Xiaohua district