

经验方法研究下垫面变化对洪水的影响^{*}

李致家¹, 周 赛¹, 姚玉梅¹, 戴健男¹, 张建中², 胡春岐³, 姚 成¹

(1: 海海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(2: 海委科技咨询中心, 天津 300170)

(3: 河北省水文水资源勘测局, 石家庄 050031)

摘 要: 1980s 以来, 人类活动对下垫面的影响加剧, 研究下垫面变化对流域产汇流规律的影响具有重要意义. 通过对海河流域中紫荆关、阜平两个流域分别用经验方法进行洪水模拟演算, 并把洪水资料按照年代不同分时段, 建立 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系图, 分析流域下垫面变化对降雨径流相关关系的影响. 建立产流量 R 与洪峰 Q_m 之间的相关关系, 通过统计比较不同年代的趋势线发现, 在产流量相同情况下, 1980s 后的洪峰流量较 1980s 前有所减少, 说明海河流域的调蓄作用有增强的趋势. 同时建立流域下垫面条件改变后产流量与洪峰变化幅度的相关关系, 发现流域产流量变化与洪峰变化呈正相关关系.

关键词: 下垫面变化; 经验方法; 单位线; $P + P_a \sim R_s$ 曲线; 海河流域

Impacts of altered basin landscape on floods using an empirical method

LI Zhijia¹, ZHOU Sai¹, YAO Yumei¹, DAI Jiannan¹, ZHANG Jianzhong², HU Chunqi³ & YAO Cheng¹

(1: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

(2: Science and Technology Information Center HWCC, Tianjin 300170, P. R. China)

(3: Hebei Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Shijiazhuang 050031, P. R. China)

Abstract: Since 1980s, with the increasing impacts of human activities on the river basin landscape, it is significant to investigate the impact of landscape changes on the rainfall-runoff regime. This paper simulated the floods occurred in the Zijinguan and Fuping catchments of the Haihe Basin using an empirical method. The flood data were segmented by time for creating the $P + P_a - R_s$ curve to analyse the influence of the altered catchment landscapes on surface flow regime. Based on the unit hydrograph method, the relationship between the runoff R and peak discharge Q_m was established. The results show that by comparison of the trendlines in different time periods, with the same runoff volume, the peak discharge after 1980s is less than that before 1980s. It indicates that the water regulation function of Haihe Basin was enhanced. Based on the relationship between the changes of runoff and peak discharge induced by the altered basin landscapes, it is found that there is a positive correlation between them.

Keywords: Altered basin landscapes; empirical method; unit hydrograph; $P + P_a - R_s$ curve; Haihe Basin

建国以来, 随着社会经济的发展, 海河流域进行了以水利建设为中心的大规模人类改造建设活动. 例如: 修建官厅水库、密云水库, 开采地下水, 对森林采取保护措施等, 使得海河流域下垫面条件已发生了显著变化: 一是地下水超采使得包气带加厚, 地下储水容积增加, 相同降雨产生的径流在近期明显减少; 二是山区水库修建使得蒸散条件发生改变; 三是地形地貌的改变对流域汇流产生影响; 四是局部区域城市面积扩大, 使得城市地区地表径流量有增大的趋势. 不断加剧的人类活动改变了海河流域下垫面条件, 下垫面条件变化对流域产汇流规律产生了重要影响, 从而对径流及洪水造成了不同程度的影响^[1]. 目前, 流域下垫面变化对径流的影响研究是一个热点问题, 流域下垫面变化对洪水的影响及机理研究更是一个难点问题. 一般

^{*} 国家博士点基金项目(20090094110005)、半湿润半干旱流域用于水文预报的新一代降雨径流水文模型研究项目(41130639)和洪水预报降雨径流分布式水文模型中新一代流域汇流模型及尺度规律研究项目(51179045)联合资助. 2011-09-07 收稿; 2011-11-08 收修修改稿. 李致家, 男, 1962 年生, 博士, 教授; E-mail: zhijia-li@vip.sina.com.

研究洪水系列变化有两种方法:一种是考虑产汇流条件机理变化的水文模型方法^[2,9],另一种是通过统计比较分析的常规经验方法.经验方法是水文生产单位最常用最易解决实际问题的方法^[2],用其研究流域产汇流变化,简单灵活,易掌握操作,其中绘制的降雨径流相关图和峰量关系图等都能十分直观地反映不同年代的变化幅度.本文致力于用经验方法来探讨研究海河流域不同年代降雨径流关系以及流量关系,并分析下垫面变化对设计洪水的影响.由于篇幅所限,仅选取紫荆关和阜平两个典型效果较好的子流域进行阐述讨论.

1 经验方法概述

1.1 降雨径流经验相关法

前期雨量指数模型(Antecedent Precipitation Index Model)又称API模型,其实用的表达形式是降雨径流相关图,故称降雨径流经验相关法^[3].计算紫荆关和阜平流域的 P 、 P_a 、 R ,绘制流域的 $P + P_a \sim R$ 图.

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

式中, $P_{a,t+1}$ 是前期影响雨量(mm); P_t 是前天日雨量(mm); $P_{a,t}$ 是前天影响雨量(mm); K 是流域土壤水消退系数.

参考海河流域技术报告,单站 P_a 每年自6月1日开始计算,并赋 P_a 初值为零,由此向后逐日推算.

计算次洪径流深 R 最常用的方法是斜线分割法^[3].先分割基流,寻找洪水过程的直接径流终止点,然后用斜线连接起涨点与终止点,斜线的上部为直接径流,下部为地下径流.

1.2 时段单位线汇流

单位线是指在给定的流域上,单位时段内时空分布均匀的一次降雨产生的单位净雨量,在流域出口断面处形成的地面(直接)径流过程线,记为UH^[3].选择一场历时较短的单峰洪水过程,分割出前后期径流和深层基流后,获得本次降雨形成的流量过程,计算洪水的直接径流深.利用降雨资料,确定时段净雨量,并使净雨量等于直接径流深,进而推算时段单位线.单位线法不考虑净雨与下垫面等条件的差异,属线性时不变系统,使得预报洪水过程通常偏离于实测流量过程^[10].

2 研究流域概况

2.1 紫荆关流域

紫荆关位于大清河流域北支拒马河上游,该河发源于河北省涞源县境内.上游石门以上为涞源盆地,石门至紫荆关之间为开阔谷地,紫荆关流域控制面积为1760 km²,主河道长81.5 km,河道纵坡5.5‰,流域平均宽度为25.4 km.流域内植被情况较差,流域多年平均降水量约为650 mm.

2.2 阜平流域

阜平位于大清河南支沙河支流上游,沙河发源于山西省灵邱县孤山.阜平以上河道纵坡平均为5.3‰,河床呈“V”形.阜平以上流域控制面积为2210 km²,流域内植被情况较差,流域多年平均降雨量约600 mm.

本文采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的1 km × 1 km DEM数据,根据该流域雨量站情况进行分块,流域水系见图1.

3 模型应用结果与分析

1980s以来,海河流域进行了以水利建设为中心的大规模的人类改造活动^[11].海河流域大清河水系多个小流域成片治理、封山育林和以发展果品产业为主的经济构建蓬勃兴起,使得海河流域的下垫面条件发生了显著变化,研究下垫面变化对洪水的影响对减少灾害损失有重要的意义.

3.1 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系的建立

根据计算的紫荆关和阜平以上流域1956—2005年降雨径流相关因素,以 $P + P_a$ 为纵坐标,以 R_s 为横坐标,将 $P + P_a$ 与 R_s 的关系分为1980s前和1980s后两个时段,在同一张图上点绘不同时期的(1980年前、后) $P + P_a \sim R_s$ 相关点据,并根据点据分布趋势建立相应的 $P + P_a \sim R_s$ 相关关系(图2).

在紫荆关流域1996年8月4日发生了一场大洪水,场次降雨127.9 mm,并且由于前期土湿较大,产生

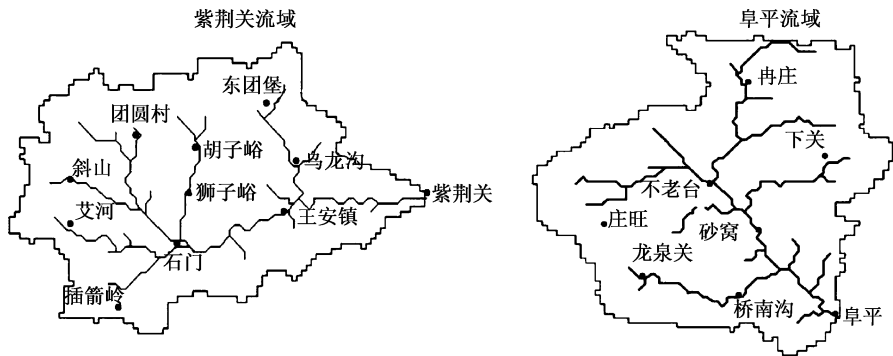


图 1 根据 DEM 数据生成的流域水系图

Fig. 1 Stream network of basin generated from DEM data

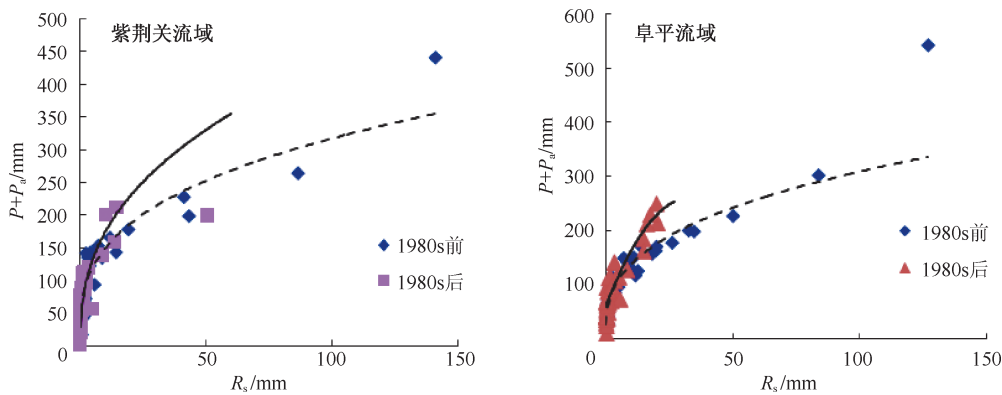


图 2 紫荆关和阜平流域 1980s 前后降雨径流关系

Fig. 2 Curve about rainfall and runoff in various periods in Zijinguan and Fuping Basins

了 50.3 mm 的径流深,属于自然成因,所以该点据偏离其他点据较多. 1980s 后的点据大都分布在 1980s 前点据的左侧,从趋势线也可看出,相同降雨量情况下,1980s 后的产流量小于 1980s 前产流量. 可以认为流域的调蓄作用正变得越来越大^[6].

3.2 产汇流计算

用 $P + P_a \sim R_s$ 经验曲线推求时段净雨量,计算 P_a 及各个时段的累积雨量,然后在 $P + P_a \sim R_s$ 经验相关图查得各时段(1 h)的累积径流深 R_s ,相邻两时段累积径流量之差就是该时段的地面径流. 本文推求径流深 R_s 采用的插值方法是拉格朗日插值.

$$R = R_{k-1}a_{k-1} + R_k a_k + R_{k+1}a_{k+1} \tag{2}$$

$$a_{k-1} = (PP_a - PP_{a_k}) \times (PP_a - PP_{a_{k+1}}) / ((PP_{a_{k-1}} - PP_{a_k}) \times (PP_{a_{k-1}} - PP_{a_{k+1}})) \tag{3}$$

$$a_k = (PP_a - PP_{a_{k-1}}) \times (PP_a - PP_{a_{k+1}}) / ((PP_{a_k} - PP_{a_{k-1}}) \times (PP_{a_k} - PP_{a_{k+1}})) \tag{4}$$

$$a_{k+1} = (PP_a - PP_{a_{k-1}}) \times (PP_a - PP_{a_k}) / ((PP_{a_{k+1}} - PP_{a_{k-1}}) \times (PP_{a_{k+1}} - PP_{a_k})) \tag{5}$$

流域汇流计算采用单位线汇流法. 根据紫荆关和阜平流域的洪水特性,利用时段单位线法,紫荆关流域选用洪号为 1964081108、1996080208 的洪水分析得出的 1 h 单位线;阜平流域选用洪号为 1959080303、1996080208 的洪水分析得出的 1 h 单位线(图 3). 从推求的单位线能直观看,流域单位线在 1980 年前后有明显差别,即 1980s 后的单位线推移坦化作用更为明显. 1980s 前的单位线偏于尖瘦,说明洪水退水快,河

道调蓄作用偏小;1980s 后的单位线较矮胖,说明洪水退水慢,河道调蓄作用偏大. 且 1980s 后的洪峰较 1980s 前明显偏小,更能说明人类活动引起下垫面变化后的削峰影响^[12].

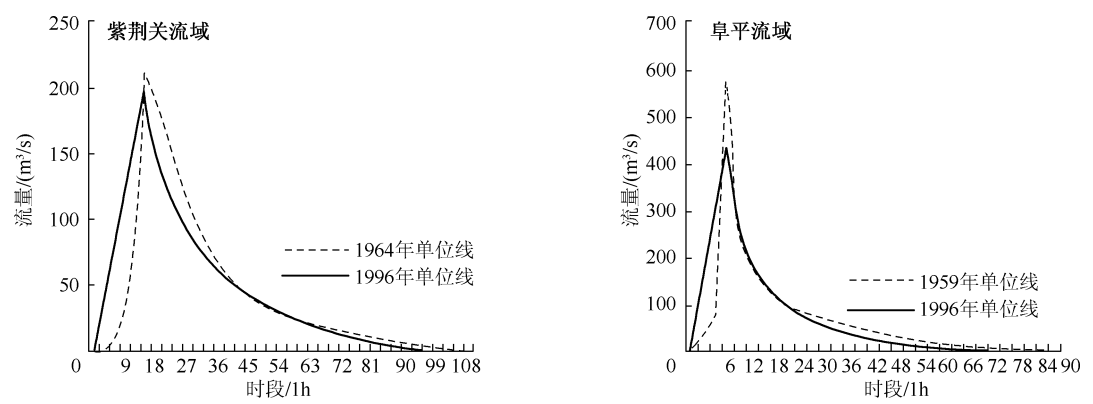


图 3 紫荆关和阜平流域单位线
Fig. 3 Unit hydrograph in Zijinguan and Fuping Basins

3.2.1 洪峰流量径流深相关水文要素的计算 从1956年起,紫荆关流域挑选了50场洪水(1980年前26场,1980年后24场)、阜平流域41场洪水(1980年前23场,1980年后18场)分别进行经验产汇流计算.流域由于人类活动的影响,在1980年以后的水文特性发生变化,故1980s前后采用不同时期的产流参数和汇流单位线.根据暴雨形成的洪水过程,计算场次洪水过程的洪水总量和径流深.紫荆关、阜平流域不同时期的洪量误差、径流深误差及洪峰误差统计见表1.各水文要素统计误差可以发现,从洪量合格率来看,1980s前后紫荆关和阜平流域都在70%以上,达到乙级标准,可以用于模型模拟研究.

为能定量分析不同时期下垫面条件对径流深和洪峰的影响,通过上述经验模型把1980s前后两套参数曲线分别对1980s前的洪水进行模拟,然后计算次径流深和洪峰变化幅度,统计结果见表2.由统计结果可见,在相同降雨条件下,流域的径流深和洪峰都明显减少,即下垫面变化对洪水的调蓄作用有所加强.且在紫荆关流域,洪峰的减少幅度大于径流深的减少幅度,说明下垫面变化对该流域洪峰的影响比对径流深的影响大.阜平流域的洪峰流量和径流深变化幅度相当.

表 1 不同时期误差特征统计
Tab. 1 Statistical error characteristics in various periods

流域	时期	洪量 合格率/%	径流深 合格率/%	洪峰 合格率/%	流域	时期	洪量 合格率/%	径流深 合格率/%	洪峰 合格率/%
紫荆关	全部洪水	77.14	77.14	68.57	阜平	全部洪水	73.33	70.00	66.67
	1980s 前	78.26	73.91	73.91		1980s 前	75.00	68.75	68.75
	1980s 后	75.00	83.33	66.67		1980s 后	71.43	71.43	64.29

表 2 产流量与洪峰变化幅度统计
Tab. 2 Statistical changes of runoff and peak discharge

流域	洪峰流量变化/%	径流深变化/%	洪量累积变化/%	径流深累积变化/%
紫荆关	-48.52	-32.45	-1698.23	-1135.70
阜平	-39.65	-40.48	-1189.65	-1214.51

3.2.2 $Q_m \sim R$ 相关关系的建立与相关程度变异分析 根据计算的紫荆关和阜平以上流域的水文要素,以洪峰为纵坐标,以径流深为横坐标,分1980s前、后两个时期,在同一张图上点绘不同时期(1980s前、后)的

$Q_m \sim R$ 相关点据,并根据点据分布趋势建立紫荆关和阜平以上流域相应的 $Q_m \sim R$ 相关关系(图4). 紫荆关以上流域,在产流量相同情况下,1980s 后的洪峰流量较 1980s 前相比有所减少,这可能是海河流域植树造林防治水土流失,地下水开采导致降水渗漏以及水库的人工调蓄等人类活动引起,反映人类活动引起下垫面变化后的削峰影响. 阜平流域的峰量关系亦如紫荆关流域,并且其洪量减少的幅度随产流量的增加呈减小趋势.

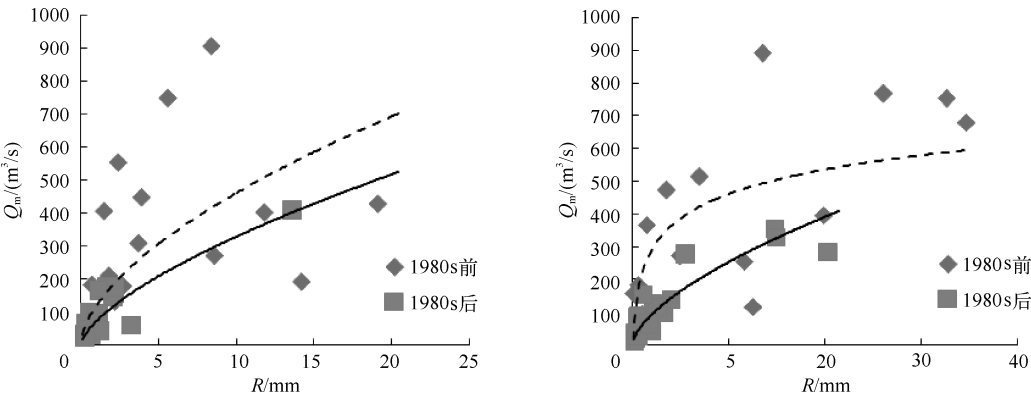


图4 紫荆关和阜平流域 1980s 前后产流量与洪峰关系

Fig.4 Curve about runoff and peak discharge in various periods in Zijingguan and Fuping Basins

3.2.3 产流量变化与洪峰变化关系的建立与相关程度变异分析 根据紫荆关和阜平以上流域的 1980 年前、后的降雨径流关系计算产流量的变化,同样用 1980 年前、后的峰量关系计算洪峰的变化,以洪峰变化为横坐标,以产流量变化为纵坐标,点绘 $\Delta R \sim \Delta Q_m$ 相关点据,并根据点据分布趋势建立紫荆关和阜平以上流域相应的产流量变化与洪峰变化幅度关系线(图5). 图中横纵坐标“-”代表减小,数值代表各参数减小的幅度. 紫荆关以上流域次洪,产流量变化 ΔR 与洪峰变化 ΔQ_m 呈正相关,其相关系数为 0.652,即同量级变化的产流量 ΔR 对应于相同量级变化的洪峰 ΔQ_m ; 阜平流域的峰量变化幅度关系亦如紫荆关流域,其相关系数为 0.674.

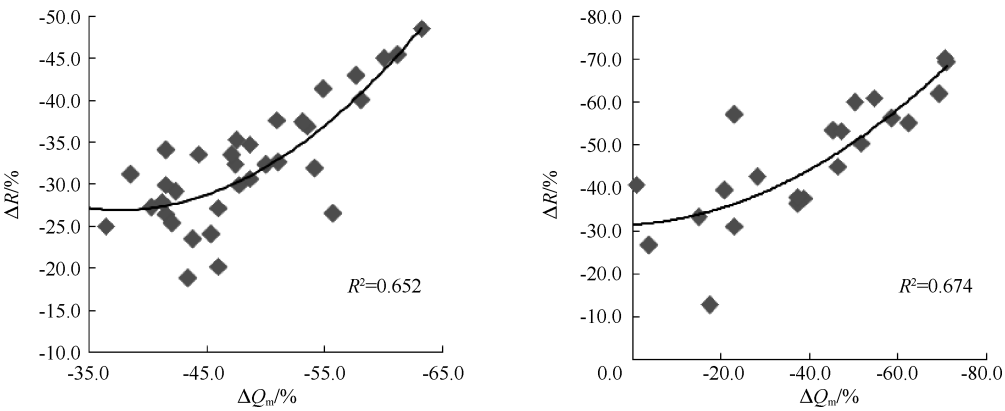


图5 紫荆关和阜平流域产流量与洪峰变化幅度关系

Fig.5 Curve about changes of runoff and peak discharge in Zijingguan and Fuping Basins

4 结语

人类活动引起流域的下垫面变化,对流域的产汇流特性存在影响. 各种相关关系随年代的变化可以反

映流域调蓄作用的增大. 从降雨径流趋势线上, 不难发现 1980s 后的点据大致分布在 1980s 前点据的左侧, 即相同降雨量情况下, 1980s 后的产流量小于 1980s 前产流量. 紫荆关流域和阜平流域的峰量关系变化同样充分反映, 由于流域下垫面变化影响, 在产流量相同情况下, 1980s 后的洪峰流量较 1980s 前相比有所减少.

5 参考文献

- [1] 胡春歧, 刘惠霞, 胡军波. 紫荆关以上流域下垫面条件变化对产汇流影响分析. 南水北调与水利科技, 2008, **6** (5): 50-55.
- [2] 赵人俊. 流域水文模型. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [3] 包为民. 水文预报: 第 3 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [4] Beven KJ, Kirkby MJ. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Science Bulletin*, 1979, **24**(1): 43-69.
- [5] Beven KJ, Wood E. Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, 1983, **65**: 139-158.
- [6] 李致家. 水文模型应用与研究. 南京: 河海大学出版社, 2008.
- [7] 李致家, 孔凡哲, 王 栋等. 现代水文模拟与预报技术. 南京: 河海大学出版社, 2010.
- [8] Beven KJ. Hillslope runoff processes and flood frequency characteristics. In: Abrahams AD ed. *Hillslope processes*. London: Allen & Unwin, 1986: 187-202.
- [9] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [10] 苏 静, 董晓华, 谭雪松. 地面径流计算误差对单位线推求的影响及对策. 中国农村水利水电, 2008, (5): 5-7.
- [11] 韩瑞光, 丁志宏, 冯 平. 人类活动对海河流域地表径流量影响的研究. 水利水电技术, 2009, **40**(3): 4-7.
- [12] 芮孝芳. 水文学原理. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.