

基于 HBV 模型确定沁河流域洪涝致灾临界雨量

赵海燕, 张亚琳, 王志伟, 茅 彧, 安 伟

(山西省气候中心, 太原 030006)

摘 要:对暴雨洪涝较为严重的沁河流域进行暴雨洪涝风险评估需要致灾临界雨量。运用半分布式水文模型 HBV, 选取以润城水文站为控制站的沁河流域 1977—1988 年逐日气象数据和水文数据, 在率定和验证水文模型 HBV 的基础上, 结合水位—流量关系, 对沁河流域洪涝致灾临界雨量进行确定, 并且运用 1982 年洪涝灾情的实测水文数据和降水量数据, 验证致灾临界降水量的合理性。结果表明:沁河流域的三级致灾临界降水量是合理的, 可作为判断该流域在不同前期水位条件下是否发生暴雨洪涝灾害的依据。

关键词:致灾临界雨量; HBV 模型; 沁河流域

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0074-05

Threshold of Precipitation for Qinhe River Basin Flood Based on HBV Model

ZHAO Haiyan, ZHANG Yalin, WANG Zhiwei, MAO Yu, AN Wei

(Shanxi Climate Centre, Taiyuan 030006, China)

Abstract: In impact assessment of floods in Qinhe Basin, with serious damages of these events, it is necessary to calculate the thresholds of precipitation. The conceptual semi-distributed hydrological model (HBV) was applied to define the threshold of precipitation (TP) for Qinhe River Basin flood, considering correlation between the water level and runoff. Daily temperature, precipitation and daily stream flow of 1977—1988 were used for calibration and verification of HBV model respectively. Taking Qinhe flood in 1982 as the example, the reasonable TP was validated based on the daily water level and flood disaster records. It was found that the third grade of TP was reasonable, which could be used to early warning for Qinhe River Basin flood.

Keywords: threshold of precipitation ; HBV model; Qinhe River Basin

黄河支流——沁河流经晋、豫两省, 是黄河三门峡至花园口区间一条较大的一级支流。由于地形、降雨和水文下垫面条件的影响, 沁河是山西最严重的暴雨洪涝发生河流之一。在全球气候变化背景下, 沁河流域大部年降水量呈显著减少趋势^[1], 沁河流域年均水资源量存在偏枯趋势^[2]。但近几年极端降水引起的洪涝灾害同样对人们的生活和工农业生产造成了严重影响。

暴雨洪涝风险预估方法一般分为经验模型、集总概念模型和分布式模型。线性模型、线性扰动模型、约束线性系统模型等属于经验模型, 其中基于偏最小二乘回归法的经验模型有助于克服水文要素间复杂的多重相关性^[3], 基于遗传程序法的经验模型是结合遗传算法和计算机程序设计的一种新演化算法, 具有适应性强、精度高特点^[4]; 赵人俊等^[5]提出的新安江模型属于集总概念模型, 是基于一些简单的水文气象物理概念和经验关系近似描述水流在流域的运动状

态, 与物理模型相比, 具有数据量小、参数少且物理意义明确等优点; SHE (System Hydrologic European)^[6-7], SWAT^[8-9], VIC^[10-11] 等属于分布式水文模型, 与传统集总概念模型相比, 分布式模型物理机理明确, 与 GCM 容易嵌套, 方便研究自然和气候变化对水文循环的影响, 能及时模拟人类活动和下垫面对流域水文循环过程的影响; TOPMODEL^[12-13] 和 HBV^[14-16] 属于半分布式水文模型, 它是集总概念模型和分布式模型的结合, 具有结构简单, 优选参数少, 物理概念明确等特点^[17-19]。

前人对沁河流域的洪涝风险研究多局限于经验模型和集总概念模型, 如李玉书^[20]对沁河流域洪峰型进行分类, 李旭峰等^[21]揭示了沁河流域“致洪”和“非致洪”的差异, 并利用面雨量建立了致洪暴雨的统计预报方程, 陈二平等^[22]基于水量平衡在沁河流域建立了流域产流模型对洪水进行预测, 然而洪水预报

结果却不太理想,可能与洪水记录少、雨量站分布不合理或建立的经验或集总概念模型考虑因素太少等有关。本文运用半分布式水文模型 HBV,选取以润城水文站为控制站的沁河流域,在率定和验证水文模型 HBV 的基础上,结合水位—流量关系,对沁河流域洪涝致灾临界雨量进行确定,旨在为政府整治河道,完善洪水防御工程提供科学参考。

1 研究资料和方法

1.1 流域概况

沁河干流总长 485 km,其中山西省境内为 363 km,占总长的 74.8%,沁河流域总面积 13 532 km²,其中山西境内 12 264 km²,占总面积的 91%。沁河是晋东南最大的河流,支流众多,其中山西省境内流域面积超过 100 km² 的较大支流有 26 条。

沁河流域呈阔叶形,地形北高南低。北部沁源县高程为 1 100~2 400 m,南部沁河出山西省境处,高程不足 300 m。流域大部分为山区,尤其是沁水县郑庄以上的干流两岸,峰峦重叠、山高谷深、盆地穿插、地形相当复杂。

流域地处我国东部季风区暖温带半湿润地区的西缘,大陆性季风气候显著。流域多年平均气温 5~11℃,北低南高。流域多年(1956—2000 年)平均降水量为 613 mm。从降水的年内分布来看,汛期(6—9 月)一般为全年降水量的 67%~74%。

1.2 研究资料

润城水文站控制的沁河流域面积为 6 514 km²,涉及到山西省安泽、沁源和阳城 3 县市。HBV 模型所需数据分为气象数据、水文数据和其他数据。气象数据包括逐日最高气温、最低气温和降水量,水文数据包括逐日径流量和水位,其他数据包括 Dem、土地利用和土壤田间持水量等。

本文选取润城水文站的逐日水文数据分 4 个时段,分别是 1964—1966 年、1977—1982 年、1983—1988 年和 2007—2010 年。考虑到水文资料和气象资料的衔接性,选择了流域内及周围的 12 个气象站逐日气温和降水量资料计算沁河流域气象数据。

本文使用的 Dem 数据分辨率为 100 m×100 m,来源于 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission),由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量。土地利用数据来源于美国 Maryland 大学发展的全球 1 km 陆面覆盖类型资料,土壤田间持水量来源于国家气候中心。

1.3 研究方法

中小河流致灾临界雨量阈值选取了 HBV 水文模

型确定。HBV 水文模型是瑞典国家水文气象局(Swedish Meteorological and Hydrological Institute, SMHI)开发研制的水文预报模型,为基于 DEM 划分子流域的(subbasin)半分布式的概念性水文模型,原理结构简单,易于实现,所需输入资料少,优选参数少,多种情况下模型误差小于 20%。模型不同版本已在全世界 40 多个位于不同气候区的国家,如瑞典、津巴布韦、印度、哥伦比亚和中国等国家的洪水预报、水资源评估、营养盐负荷估算等领域得到广泛应用^[14-16]。

(1) 数据准备。包括子流域划分和气象数据插值。本文基于 GIS 平台把沁河流域划分为 3 个子流域,面积分别为:1 066,3 372,2 076 km²;子流域逐日降水量和气温值分别运用 IDW, Kriging 法进行插值运算。

(2) 率定模型。通过对 HBV 参数的敏感性试验,获取沁河流域的优选参数。本文选取 1983—1988 年逐日最高气温、最低气温、降水量和径流量来率定 HBV 模型,获取模型优选参数。

(3) 验证模型。通过比较实际径流量和 HBV 输出的模拟径流量的关系确定该模型在沁河流域的适用性。本文选取 1977—1982 年逐日数据来验证 HBV 模型。

(4) 建立水位—流量关系。根据水位—流量关系和河道特征水位可以得到不同等级洪涝风险对应的逐日径流量。由于水位资料在某些年份的缺失,本文选取 1964—1966 年、1977—1981 年、2007—2010 年 3 个时段的逐日径流量和水位进行流量—水位关系的确定。

(5) 计算降水量阈值。假设不同前期水位条件,运用 HBV 模型逐渐增加当日降水量,对逐日径流量进行模拟,直至当日或次日径流量达到某级暴雨洪涝风险对应的逐日径流量,定义当日降水量为前期某水位条件下的某级洪涝风险阈值。

2 结果与分析

2.1 HBV 模型率定和验证

根据敏感性试验确定的 HBV 的敏感性参数分别为 BETA(Non-linearity in soil water zone), KUZ2 (Quick time constant upper zone), KUZ1 (Slow time constant upper zone), KLZ (Time constant lower zone), UZ1 (Threshold quick runoff), PERC (Percolation to lower zone),这 6 个参数的初始值范围分别设定为 0.26~0.29,0.090~0.120,0.030~0.040,0.004~0.006,4.08~6.08,0.36~0.66 mm,变动幅度分别为 0.01,0.01,0.005,0.001,1.0,0.1

mm,经过试错法调试模型。将这些参数的不同组合输入到 HBV 水文模型,几组参数取值及其模拟效果见表 1,结合率定期(图 1A)($R=0.654\ 9$)和验证期(图 1B)($R=0.680\ 0$)的模拟值和观测值的相关性,最终确定第 2 组参数为沁河流域 HBV 模型的水文参数(表 1)。由图 1 可知,HBV 水文模型能模拟出沁河流域润城水文站径流量的年内变化和年际变化,并能很好地模拟出 1982 年 8 月的洪水过程。

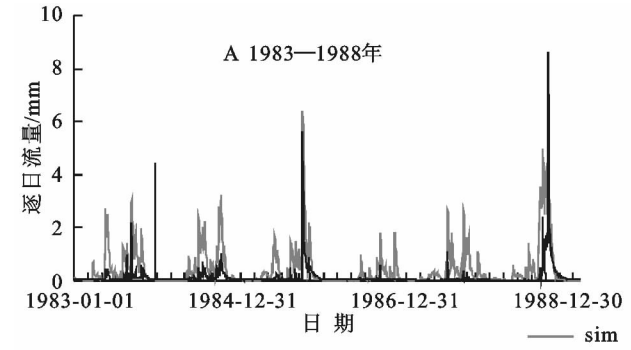


表 1 沁河流域 HBV 模型参数

敏感性参数	参数组		
	1	2	3
BETA	0.29	0.29	0.29
KUZ2	0.090	0.090	0.090
KUZ1	0.030	0.030	0.030
KLZ	0.004	0.005	0.006
UZ1	6.08	6.08	6.08
PERC	0.66	0.66	0.66
R	0.655	0.6549	0.6548

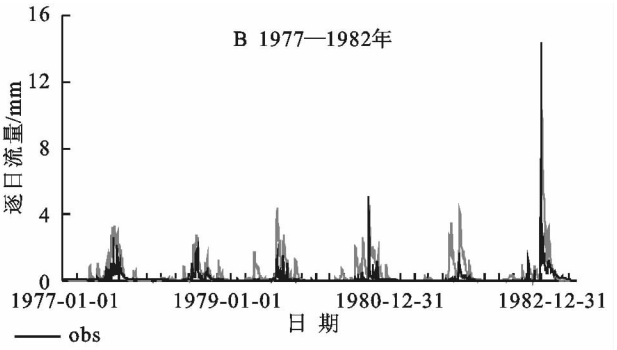


图 1 沁河流域实测和模拟逐日径流量

2.2 水位—流量关系的确定

沁河流域水位—流量关系的确定选取润城水文站径流量记录比较完整的 1964—1966 年、1977—1981 年、2007—2010 年 3 个时段的逐日径流量。润城水文站历史最低水位为 405.6 m,最高水位为 417.3 m^[23]。确定水位—流量关系时,由于主要研究致洪降水量,而河道低水位时干扰因素对水位影响较大,因此这里只考虑水势上涨时水位与流量关系,本文分别选取了历年 4—10 月水位值高于 406,406.5,407 m 的逐日流量记录,建立沁河流域水位—流量关系,其中基于水位值高于 407 m 的逐日流量记录建立的沁河流域水位—流量关系相关性最高(图 2),因此选取该水位—流量关系,结合河道特征水位计算不同等级洪涝风险对应的逐日径流量。

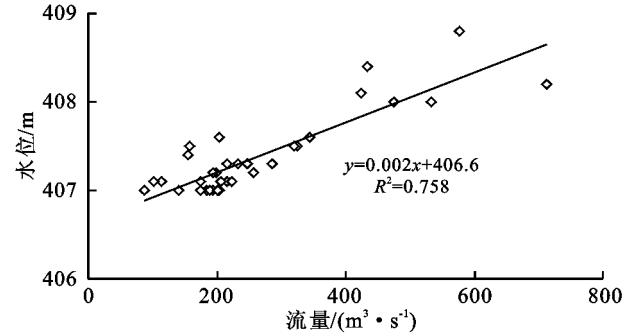


图 2 沁河流域水位—流量关系

2.3 致灾临界阈值的确定

(1) 试验设置。分别选取了 2010 年第 172 天、2009 年第 130 天、2007 年第 216 天、2007 年第 214 天、1966 年第 207 天的水位条件作为初始条件进行模拟。选取 2010 年第 172 天的原因是:该日之前

10 天没有大的降水量,水位值为 405.6 m,属于历史最低水位水平。2009 年第 130 天、2007 年第 216 天、2007 年第 214 天、1966 年第 207 天的水位分别是 406,406.5,407,407.5 m。

(2) 临界水位。根据历史资料记载和普查资料显示,润城水文站的最低水位是 405.6 m,历史上发生过多次洪水,其中有水位或流量记录的有 6 次(表 2)。

表 2 润城水文站历史洪水记录

时间	水位/m	流量/(m³·s ⁻¹)
1895 年	417.30	5030
1943 年	415.50	3870
1954 年 8 月 13 日	411.30	2200
1932 年	410.38	—
1933 年	409.51	—
1982 年 8 月 2 日	—	2750
2007 年 7 月 30 日	408.8	578

由于该水文站缺乏特征水位资料,本文分别选取了 2007 年 7 月 31 日洪水位(408.4 m)、1933 年洪水位(409.51 m)、1932 年洪水位(410.38 m)^[14]作为 3 级、2 级和 1 级致灾临界水位。需要说明的是,虽然 2007 年 7 月 31 日较 7 月 30 日的水位(408.8 m)有所下降,但洪涝灾情仍持续发生,因此定义 7 月 31 日的水位为 3 级致灾临界水位。

(3) 阈值试验结果。2010 年第 172 天的水位值为 405.6 m,逐渐增大第 173 天降水量,当降水量为 144 mm,次日(第 174 天)流量为 10.89 mm,根据水位—流量关系,第 174 天模拟水位达到 3 级致灾临界水位 408.40 m(图 3)。在其他前期水位条件下确定

各级洪水临界雨量的方法类似,结果见表 3。

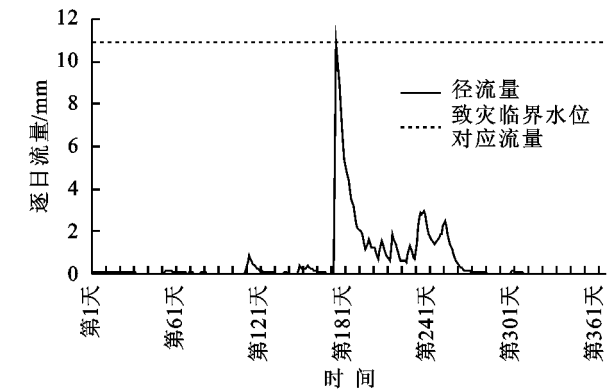


图 3 2010 年沁河流域逐日径流量模拟值

(4) 阈值验证。1982 年 7 月 29 日—8 月 4 日,受 9 号台风影响,山西省北部部分地区和中南部大部分地区出现长达 7 d 的大范围暴雨和大暴雨天气,造成建国以来最严重的洪水灾害。沁水县 7 月 30 日—8 月 3 日总降水量达 405.3 mm。阳城县 7 月 29 日—8 月

表 3 沁河流域各级暴雨洪涝致灾临界雨量

前期水 位值/m	3 级		2 级		1 级	
	降水量/mm	水位/m	降水量/mm	水位/m	降水量/mm	水位/m
405.6	144	408.40	211	409.51	263	410.38
406.0	112	408.41	179	409.52	231	410.38
406.5	81	408.40	151	409.52	203	410.38
407.0	63	408.41	135	409.52	187	410.39
407.5	49	408.40	122	409.51	175	410.39

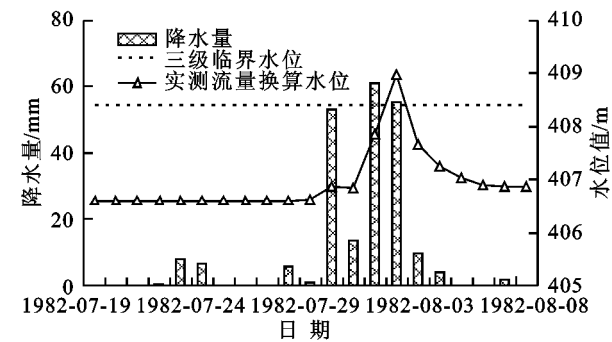


图 4 1982 年 7 月 19 日—8 月 8 日沁河流域逐日降水量与水位

3 结论与讨论

(1) 选取 1983—1988 年逐日气象数据和水文数据对 HBV 模型进行参数率定,选取 1977—1982 年对确定的模型参数进行验证,结果表明:HBV 模型对沁河流域的径流量有较好的模拟能力,可用来进行逐日径流量的模拟。

(2) 选取润城水位站径流量记录比较完整的 1964—1966 年、1977—1981 年、2007—2010 年 3 个时段的逐日径流量和水位进行沁河流域水位—流量关系的确定。结果表明:基于水位值高于 407 m 的

3 日总降水量达 327.9 mm^[24]。

运用 HBV 模型模拟显示,1982 年 7 月 30 日沁河流域降雨量 53 mm,沁河水位由 406.6 m 上涨至 406.9 m;7 月 31 日降水量 14 mm,沁河水位下降至 406.8 m;8 月 1 日降水量 61 mm,降水量未达到前期水位 406.5 时的 3 级致灾临界降水量 81 mm,因此 8 月 1 日水位仅上涨至 407.9 m,未达到 3 级致灾临界水位 408.4 m;8 月 2 日降水量 55 mm,降水量超过前期水位 407.5 时的 3 级致灾临界降水量 49 mm,因此水位上升至 408.5 m,超过 3 级致灾临界水位 408.4 m;8 月 3 日降水量 10 mm,沁河水位下降至 407.9 m(图 4)。以上分析可得,沁河流域的 3 级致灾临界降水量是合理的,可作为判断该流域在不同前期水位条件下是否发生暴雨洪涝灾害的依据。需要说明的是由于缺乏 1982 年逐日水位值,本节所用水位值由逐日流量值和水位—流量关系换算得到。

逐日流量记录建立的沁河流域水位—流量关系相关性最高。

(3) 利用几次历史洪水位,确定不同等级致灾临界水位。在不同水位条件下,运用 HBV 模型,结合水位—流量关系,最终确定沁河流域各级致灾临界降水量。运用 1982 年洪涝灾情的实测水文数据和降水量数据,验证致灾临界降水量的合理性。结果表明:沁河流域的 3 级致灾临界降水量是合理的,可作为判断该流域在不同前期水位条件下是否发生暴雨洪涝灾害的依据。由于暴雨洪涝的水文数据比较缺乏,本文未对其他等级的致灾临界降水量进行验证,在获取相关数据后可做进一步验证。

(4) HBV 模型存在不确定性。在模型的参数率定和验证中,根据前人研究成果,仅对某些参数进行敏感性分析,且未考虑土地利用和河道自身变化对径流量的影响,而不同土地利用类型对产流过程有着较大影响^[25],城市化等人类活动会改变下垫面性质进而影响洪涝灾害的发生^[26]。因此在沁河流域运用 HBV 模型模拟沁河流域的径流量仍然存在不确定性。

(5) 本文仅考虑全流域降水空间分布一致条件

下的致灾临界雨量,而不同暴雨空间分布对径流量的影响有所不同;且所用 HBV 模型输出数据是逐日径流量,确定的致灾临界雨量虽然考虑了前期水位,但并没有更合理的考虑洪峰与洪量的共同影响,其结果可能导致对洪水风险的估计不足^[27]。

参考文献:

- [1] 刘勤,严昌荣,张燕卿,等.近 50 a 黄河流域气温和降水量变化特征分析[J].中国农业气象,2012,33(4):475-480.
- [2] 张志红,陈红莉,何宏谋.沁河流域近十几年来水资源量偏枯原因[J].水文,2004,24(1):32-34.
- [3] 丁胜祥,董增川,张莉,等.基于偏最小二乘回归的洪水预报方法[J].河海大学学报:自然科学版,2011,39(4):367-371.
- [4] 魏明华,郑志宏,黄强,等.基于遗传程序设计的产流预报模型[J].沈阳农业大学学报,2011,42(1):84-89.
- [5] 赵人俊,王佩兰.新安江模型参数的分析[J].水文,1988(6):2-9.
- [6] Abbott M B., Bathurst J C, Cunge J A, et al. An introduction to the European Hydrological System: Systeme Hydrologique Europeen, 'SHE', 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system[J]. Journal of Hydrology, 1986, 87(1/2): 61-67.
- [7] Bathurst J C, Wicks J M, O'Connell P E. The SHE/SHESD basin scale water flow and sediment transport modeling system[C]// Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton: Water Resource Publications, 1995.
- [8] 熊立华,郭生练.分布式流域水文模型[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [9] 谢媛媛. SWAT 模型在黄土丘陵区参数敏感度分析及率正研究[J].水土保持研究,2012,19(4):204-206.
- [10] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1994, 99 (D7): 14415-14428.
- [11] 张兰影,庞博,徐宗学,等. VIC 模型与新安江模型径流模拟对比研究[J].北京师范大学学报:自然科学版, 2013, 49(2/3): 139-144.
- [12] Beven K J, Kirkby M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [13] Beven K, Lamb R, Quinn P, et al. Topmodel[C]// Singh V P. Computer Models of Watershed Hydrology. Littleton: Water Resource Publications, 1995.
- [14] Bergström S. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments [R]. Norrköping: SMHI RHO 7, 1976.
- [15] Seibert J. HBV light version 1.3 User's manual[Z]. Uppsala: Dept of Earth Science, Hydrology, Uppsala University, 1998.
- [16] Bergström S. The HBV model [C]// Singh V. Computer models of watershed Hydrology. Water Resources Pub., 1995.
- [17] 彭涛,张利平,沈铁元,等.现代水文气象预报技术研究进展[J].人民黄河,2010,32(9):29-32.
- [18] 董先勇,樊明兰,缪韧,等.流域水文模型在川中丘陵区小流域水沙过程研究中的应用[J].水土保持研究, 2007, 14(3): 300-302, 305.
- [19] 赵琳娜,包红军,田付友,等.水文气象研究进展[J].气象,2012,38(2):147-154.
- [20] 李玉书.沁河流域致洪暴雨特征[J].山西气象, 1994 (2): 31-33.
- [21] 李旭峰,李玉书.山西沁河流域面雨量与致洪暴雨预报技术探讨[J].山西气象,1995(4):19-20.
- [22] 陈二平,李玉书.沁河流域洪水估算和预报[J].山西气象,1995(4):21-25.
- [23] 山西省水利厅.山西省历史洪水调查成果第六分册:沁河水系[M].郑州:黄河水利出版社,2011.
- [24] 温克刚.中国气象灾害大典:山西卷[M].北京:气象出版社,2005.
- [25] 孟广涛,毛谔,方向京,等.模拟暴雨条件下珠江上游不同地被产流产沙过程研究[J].水土保持研究,2007,14 (1): 287-288, 294.
- [26] 石怡,许有鹏,蔡娟.城市化对秦淮河中下游洪涝灾害风险的影响分析[J].水土保持研究,2011,18(5):26-31.
- [27] 李晓粤,翟国静.多变量洪水风险分析方法[J].水土保持研究,2006,13(1):8-10.