

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220825

HSPF 模型在涪水流域洪水预报中的应用

莫军成¹, 黄春福^{2,3}, 杨家亮¹, 隆院男^{2,3}

(1. 湖南省水利水电勘测设计规划研究总院有限公司, 湖南长沙 410007; 2. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114; 3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要:近年来,流域暴雨洪水灾害事件频发,准确、可靠的洪水预报是有效预防和抵御山洪灾害的重要措施。以涪水流域为研究区域,构建 HSPF 半分布式模型,选取流域 2013~2020 年洪水资料中代表性较好的场次洪水完成模型参数的率定和验证,并采用确定性系数、相对误差等指标进行洪水模拟精度评价。结果表明,该模型在涪水流域场次洪水模拟中表现良好,15 场洪水模拟的峰现时间、洪峰流量合格率分别为 100.0%、80.0%,洪量及径流深的模拟合格率均为 93.3%,确定性系数均值为 0.80,总体预报精度达到乙级,说明构建的 HSPF 洪水预报模型在涪水流域具有较好的适用性,可为该地区的洪水预报提供依据。

关键词: HSPF 模型; 半分布式水文模型; 涪水流域; 洪水

中图分类号: TV124

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0070-04

1 概况

涪水流域位于湖南省株洲醴陵市、江西省萍乡市境内,系湘江一级支流,有南、北两处发源地。研究区域面积约 3 047 km²,呈三角形,横跨湘东赣西近 10 个县(市)。流域气候类型属亚热带季风性湿润气候,年降雨量约 1 750 mm,降水丰沛,雨期主要集中在 4~8 月,易发生强度大、持续时间长的大暴雨,造成山洪、洪涝等灾害,严重威胁人民生命财产安全。当前针对涪水流域的洪水研究较少,流域洪水预报问题亟待解决。以 HSPF 模型为代表的半分布式水文模型集合了分布式和集总式水文模型的优势,提高了水文模型在流域模拟中的准确性。然而目前国内对于 HSPF 的研究和应用却很少^[1-3],因此针对 HSPF 模型开展适用性研究并总结模拟经验有助于推动该模型在我国的应用与发展。鉴于此,本文构建了涪水流域 HSPF 半分布式水文模型,并分析了该模型在涪水流域洪水预报中的适应性,旨在为该区域及其下游的防洪工程调度提供科学依据和技术方法。

2 研究资料与方法

2.1 数据来源

2.1.1 空间地理数据

采用的空间地理数据包括 DEM 数据、土地利用数据及土壤数据等,DEM 数据下载自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>);土地利用数据源于 2015 年 Landsat-8 OLI 遥感影像,通过遥感解译按照 LUC 分类体系分为耕地、林地、草地、水体、城镇和裸地六类(图 1(a));土壤数据源于《1:1 000 000 个中华人民共和国土壤图》、《中国土种志》,流域内主要为筒育低活性强酸土、人为堆积土等(图 1(b))。

2.1.2 水文气象数据

采用涪水流域控制站大西滩 2013~2020 年的小时流量数据,从中选取 15 场次洪水资料,各场次洪水的起止时间和洪峰流量见表 1。综合考虑气象数据完整性及 HSPF 模型模拟时间段合理性,选取流域内花麦田、王仙、醴陵、萍乡、上栗 5 个雨量站 1990~2020 年的降雨、蒸发资料作为模型的输入数据,流量资料由湖南省水文水资源勘测中心提供,气象数据由中国气象数据网提供。

收稿日期: 2022-04-23, **修回日期:** 2022-05-26

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079010);湖南省水利科技项目(XSKJ2019081-45);湖南省重点研发计划(2020SK2130,2020SK2129)

作者简介: 莫军成(1982-),男,高级工程师,研究方向为水文水资源,E-mail:mojc1982@163.com

通讯作者: 杨家亮(1981-),男,高级工程师,研究方向为水利规划,E-mail:79142920@qq.com

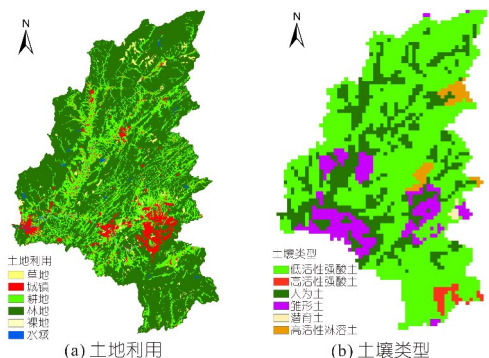


图 1 涿水流域土地利用和土壤类型数据

Fig. 1 Land use type and soil type of Lushui Basin

表 1 研究区域选用的场次洪水资料

Tab. 1 Flood data selected in the study area

序号	洪号	洪水起止时间		洪峰流量 (/m ³ ·s ⁻¹)
		开始	结束	
1	130626	06-26 16:00	07-09 07:00	843
2	140429	04-29 09:00	06-06 15:00	2 700
3	150526	05-26 08:00	06-04 23:00	1 130
4	151115	11-15 18:00	11-23 14:00	982
5	160407	04-07 22:00	04-15 11:00	477
6	160602	06-02 09:00	06-10 04:00	643
7	170315	03-15 20:00	04-14 08:00	1 010
8	170614	06-14 18:00	07-12 08:00	1 870
9	180420	04-20 03:00	05-02 08:00	440
10	190108	01-08 16:00	01-18 04:00	293
11	190620	06-20 19:00	06-27 07:00	1 260
12	190626	06-26 03:00	07-30 11:00	3 270
13	200513	05-13 08:00	05-21 06:00	800
14	200519	05-19 13:00	06-24 06:00	2 050
15	200708	07-08 11:00	07-14 17:00	1 510

2.2 研究方法

2.2.1 HSPF 模型

HSPF 模型主要包括透水地段模块 (PERLND)、不透水地段模块 (IMPLND) 和地表水体 (RCHRES) 3 个核心模块, 可模拟流域径流、污染物流动扩散等过程, 以及城市不透水面的水文循环过程^[4]。

HSPF 模型中参数众多, 借鉴文献^[5], 遴选了 6 个对场次洪水模拟有较高灵敏度的模型参数, 作为本次研究的主要参数。各主要参数含义^[6]及其取值范围见表 2。

表 2 模型主要敏感参数含义及取值范围

Tab. 2 Meaning and value range of main sensitive parameters of the model

参数名称	含义	最大取值范围	典型取值范围
LZSN	下土壤层蓄水量/in	2~15	3~8
UZSN	上土壤层蓄水量/in	0.05~2	0.1~1
INFILT	土壤下渗率/(in·h ⁻¹)	0.001~0.5	0.01~0.25
IRC	壤中流消退系数/d ⁻¹	0.3~0.85	0.5~0.7
AGWRC	地下水消退系数	0.85~0.999	0.92~0.99
INTFW	壤中流出系数	1~10	1~3

表 2 中 UZSN、LZSN 分别表示上下土壤层的蓄积能力, 对地表总径流有较大影响, 增加 UZSN、LZSN 值将会提高土壤层的蓄水容量, 同

时提高土壤蒸发能力, 进而导致地表产流量减少。调整 INFILT 可改变降雨在地表径流、壤中流、上下土壤层蓄量及地下径流中的分配比例, 增加 INFILT 值会减少地表径流总量, 增加土壤层的含水率, 提高基流量, 对于洪峰较高的过程线有明显调节作用。AGWRC 等于当前地下水流量与 24 h 前流量的比值, 降低 AGWRC 值将会使洪水过程线的退水过程变得平缓, 并降低基流量。INTFW 控制径流进程中壤中流和地表径流的比例, 提高 INTFW 值即增加壤中流流量、减少地表径流, 会对洪峰峰值产生影响, 同时也会改变洪水过程线的形状, 推迟峰现时间。IRC 值的变化会对土壤水量存储期间的产流量产生影响, 并决定了洪水过程落水阶段的快慢。

2.2.2 基于气象分布变异划分水文响应单元

通过 ArcGIS 的水文分析功能, 结合 BASINS 流域自动划分工具, 将研究流域划分为 25 个子流域, 利用泰森多边形方法, 考虑研究流域内气象资料的空间变异性, 将气象资料合理分配到各子流域, 以更好地反映水文变量和参数的空间分异性对研究流域内水文过程的影响。基于泰森多边形方法的涿水流域子流域和气象站点的对应分配图见图 2。

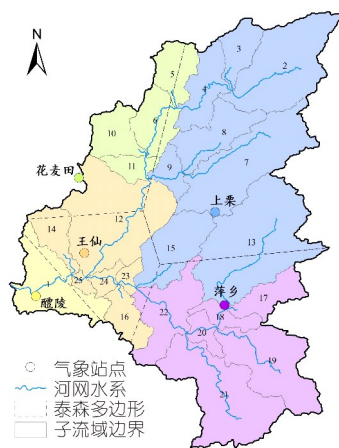


图 2 涿水流域子流域与气象站点分配关系

Fig. 2 Distribution relationship between subbasins and meteorological stations in Lushui Basin

将涿水流域划分为 25 个子流域, 其中最大子流域面积为 353.57 km², 最小子流域面积为 12.62 km²。上栗站控制的子流域个数最多, 为 8 个; 醴陵站控制的子流域个数最少, 仅 1 个。

2.2.3 构建气象数据库

HSPF 模型主要的气象输入数据包括降雨、蒸散发能力、大气温度、风速、太阳辐射、露点温度、云量^[5]。本次研究对场次洪水过程进行模拟计算, 故需要小时精度的气象数据。由于降雨和

蒸发数据序列的时间步长不一致,因此采用经验公式分解日蒸发数据,获得逐小时的蒸发量。此外,由于其他小时时间序列数据缺少实测资料,但为保证数据的完整性,仍需输入空的时间序列数据。最终创建 5 个站点的气象数据库(WDM 时间序列文件)。

2.2.4 搭建 HSPF 模型

基础数据的前处理主要包括完成子流域划分的 BASINS 文件(包含出水口、河网水系、各子流域属性信息等)、土地利用类型数据、土壤类型数据、水文气象数据库(WDM 时间序列文件)及气象站点的空间分配。

基于 BASINS 系统平台中 Models 模块下的 HSPF 模型,结合预处理的数据,可实现向 WinHSPF 的跳转,同时自动生成 .uci 格式文件供 WinHSPF 工程调用。在跳转过程中,需设置流域的透水面积和不透水面积的比例,设置城镇用地的不透水面积为 50%,其他土地利用类型的不透水面积均设为 0。跳转完成后,需进一步设定模型模拟时段、模拟参数、数据输入输出及气象数据的空间异质性,至此,涿水流域 HSPF 模型构建完成。

2.2.5 洪水精度评价指标

选用径流深相对误差 δ_R 、洪峰流量相对误差 δ_Q 及确定性系数 D_c 三个评价指标对 HSPF 模型的场次洪水模拟结果进行精度评价。其中,相对误差 δ 的计算公式为:

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^n Y_{obi} - \sum_{i=1}^n Y_{moi} \right) / \sum_{i=1}^n Y_{obi} \quad (1)$$

式中, Y_{obi} 为实测值; Y_{moi} 为模拟值; n 为时段数。

确定性系数 D_c 能够反映模拟值与实测值的拟合程度,其值越接近 1,表明拟合程度越高,模拟结果越可靠^[7]。计算公式为:

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, x 、 x_i 、 \bar{x} 分别为模拟值、实测值和实测值的均值。

根据《水文情报预报规范(GB/T 22482-2008)》^[8]的规定,对径流深和洪峰流量的预报值相对误差以 20% 作为许可误差。当一次模拟的误差小于许可误差时,可称为一次合格模拟。洪水预报合格率的计算公式为:

$$Q_R = (n'/m) \times 100\% \quad (3)$$

式中, Q_R 为合格率; n' 为预报合格数; m 为预报总数。

3 结果分析

基于优选后的参数,采用人工率定的方法对收集到的 15 场洪水过程进行模型的率定与验证,其中 6 场洪水用于模型的参数率定,9 场洪水用于模型验证。模型参数的初始值及率定值见表 3,模拟结果误差汇总见表 4,其中 4 场洪水模拟结果见图 3。

表 3 HSPF 模型参数的初始值及率定值

Tab.3 Initial value and calibration value of HSPF model parameters

参数名称	参数初始值	参数率定值
LZSN/in	6.5	4
UZSN/in	1.128	1
INFILT/(in · h ⁻¹)	0.16	0.055
IRC/d ⁻¹	0.5	0.24
AGWRC	0.98	0.998
INTFW	0.75	9

由表 3、4 及图 3 可知:①径流深和洪量预报。15 场洪水中共有 14 场洪水的径流深及洪量偏差百分比在 ±20% 之内,其中有 5 场洪水的相对误差在 ±10% 之内。在率定和验证阶段分别有 5 场

表 4 HSPF 模型场次洪水率定及验证结果汇总表

Tab.4 Summary of flood calibration and verification results of HSPF model

时期	场次洪水	实测径流深/mm	模拟径流深/mm	径流深相对误差/%	实测洪量 /10 ⁴ m ³	模拟洪量 /10 ⁴ m ³	洪量相对误差/%	实测洪峰流量 /(m ³ · s ⁻¹)	模拟洪峰流量 /(m ³ · s ⁻¹)	洪峰相对误差/%	峰现时间 误差/h	确定性系数 D _c
率定期	130626	27.20	30.69	-12.83	8 288.75	9 352.15	-12.83	843	867	-2.85	0	0.82
	140429	339.32	291.61	14.06	103 389.50	88 854.80	14.06	2 700	2 358	12.67	0	0.73
	150526	31.41	40.54	-29.07	9 570.24	12 351.99	-29.07	1 130	1 182	-4.60	0	0.78
	151125	49.78	58.10	-16.71	15 169.32	17 703.87	-16.71	982	1 026	-4.48	-1	0.88
	160407	43.36	41.18	5.04	13 213.08	12 547.10	5.04	477	487	-2.10	0	0.75
	160602	31.15	35.26	-13.21	9 490.64	10 744.01	-13.21	643	822	-27.84	0	0.88
验证期	170315	62.76	75.13	-19.71	19 123.42	22 891.78	-19.71	1 010	860	14.81	-2	0.71
	170614	282.23	295.91	-4.85	85 996.87	90 163.72	-4.85	1 870	1 441	22.97	-2	0.77
	180420	26.24	30.49	-16.21	7 994.45	9 290.58	-16.21	440	396	9.93	0	0.79
	190108	36.19	34.09	5.82	11 028.47	10 386.59	5.82	293	269	8.19	0	0.87
	190620	38.61	31.31	18.91	11 763.30	9 539.36	18.91	1 260	1 498	-18.89	-1	0.83
	190626	298.62	254.06	14.92	90 989.57	77 410.81	14.92	3 270	3 159	3.39	+1	0.86
	200513	37.04	35.19	4.97	11 284.99	10 723.66	4.97	800	629	21.38	0	0.70
	200519	203.01	227.51	-12.07	61 856.28	69 323.06	-12.07	2 050	1 943	5.22	0	0.76
	200708	71.36	76.06	-6.58	21 744.54	23 174.40	-6.58	1 510	1 402	7.15	-1	0.90

注:表中峰现时间为正值表示峰现时间提前,负值表示峰现时间滞后。

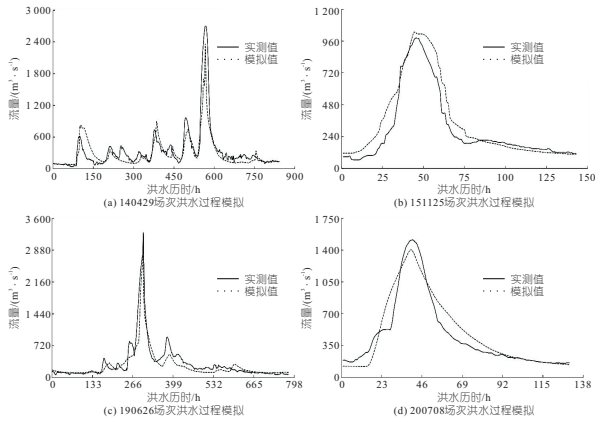


图 3 率定及验证阶段场次洪水过程模拟对比图

Fig. 3 Comparison diagram of flood process simulation in calibration and verification stage

和 9 场洪水的径流深及洪量预报相对误差在许可误差范围之内, 模拟合格率分别为 83.3%、100.0%, 率定期精度为乙等, 验证期精度达到甲等。由此可见, 在两个时期内模型对径流深和洪量的模拟效果较好, 且验证期略高于率定期。②洪峰流量预报。15 场洪水中共有 12 场洪水的洪峰流量偏差百分比在 $\pm 20\%$ 之内, 其中有 9 场洪水的洪峰误差在 $\pm 10\%$ 之内, 仅有 3 场洪水的洪峰相对误差超过 20%, 分别为 -27.84% 、 22.97% 、 21.38% 。在率定和验证阶段分别有 5、7 场洪水的洪峰流量预报相对误差在许可误差范围内, 模拟合格率分别为 83.3%、77.8%, 率定期、验证期精度均达到乙等。由此可见, 在两个时期内模型对洪峰流量的模拟精度较好。③峰现时间预报。15 场洪水的峰现时间误差均在许可误差 ± 3 h 内, 且有 9 场洪水的峰现时间完全无误差。率定和验证阶段场次洪水的峰现时间误差满足许可误差, 模拟合格率为 100.0%, 精度均达到甲等。从整体上看, 两时期场次洪水峰现时间的模拟效果均较好。④确定性系数。15 场洪水的确定系数均在 0.70 以上, 确定性系数均值为 0.80, 模拟精度均达到乙等及以上。其中, 确定性系数 $D_c \geq 0.90$ 的洪水共有 1 场, 为验证期内的场次洪水; 确定性系数 D_c 介于 0.7~0.9 之间的洪水有 14 场, 率定期和验证期内分别有 6、8 场。由此可见, 在两个时期内场次洪水模拟值与实测值的拟合程度较高, 模拟结果可靠。

个别场次洪水的模拟效果较差, 如 150526 场次洪水的径流深及洪量模拟偏高, 160602、170614、200513 场次洪水的洪峰流量模拟偏差超出规定的许可误差, 主要是因为 150526、160602 场次洪水形成前期, 涑水流域内降雨偏少, 土壤相对干燥, 实际前期土壤含水率较低, 而模型未能准

确反映这一情况, 对于土壤层蓄水容量的模拟偏小, 汛期地表产流量模拟值偏大, 进而导致 150526 场次洪水的径流深、洪量模拟值及 160602 场次洪水的洪峰流量模拟值均高于实测值; 另外, 由于气象数据处理过程是将日降雨量分解为小时降雨量, 可能导致实际中 170614、200513 场次降雨的小时极端雨量被均分削减, 雨型变得平坦, 造成 170614、200513 场次洪水的洪峰流量模拟小于实际情况; 同时, 数据质量、参数的不确定性等也有可能影响模型的模拟精度。

综上所述, HSPF 模型在涑水流域对洪水三要素、径流深及确定性系数的模拟效果较好, 根据模拟精度评价等级, 可确定该预报精度等级为乙级。经过参数率定和验证, 该模型在涑水流域的模拟精度满足《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)^[8] 的要求, 可为该地区的洪水预报提供重要参考意见, 同时也说明 HSPF 模型在中国南方湿润地区的应用效果较好, 可为模型进一步推广提供参考。

4 结论

a. 利用 HSPF 模型构建涑水流域洪水预报模型, 并收集 2013~2020 年共 15 场次洪水资料进行率定与验证, 确定性系数均值达 0.80, 洪峰流量、洪量、径流深和峰现时间的合格率分别达 80.0%、93.3%、93.3%、100.0%, 为乙等预报水平, 模拟效果较好。

b. 模型适用于涑水流域的实际预报, 可为该区域及下游地区的防洪工程调度提供科学依据和技术方法。

参考文献:

- [1] 程晓光, 张静, 宫辉力. 半干旱半湿润地区 HSPF 模型水文模拟及参数不确定性研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3179-3187.
- [2] 李金城, 高伟, 常学秀, 等. 子流域划分对 HSPF 模型径流模拟效果的影响[J]. 水电能源科学, 2018, 36(10): 27-30.
- [3] 刘兴坡, 陈心能, 卢木子, 等. 降雨输入对青龙河流域 HSPF 模型模拟结果的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 178-185.
- [4] 闫世雄. 涑水流域城市扩张的洪水响应研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020.
- [5] 董延军, 陈文龙, 杨芳, 等. HSPF 模型原理与模拟应用[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014.
- [6] 桂哈亮, 张春萍, 武治国, 等. HSPF 在热带沿海流域水文模拟中的应用[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 115-120, 129.
- [7] 晁丽君, 李致家, 李巧玲, 等. 基于 CASC2D 模型的县北沟流域径流模拟研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(1): 17-20.
- [8] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: GB/T 22482-2008[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.

4 结 论

a. 黄河下游东阿段 2021 年 6~10 月降雨量显著增加,使黄河水和区域地下水均显著增大,导致黄河侧渗的地下水排泄不畅,是造成黄河大堤外侧水井涌水的基础原因。

b. 当黄河持续高水位运行时,最高达 41.5 m,对地下水的补给强度增加,黄河水入渗补给含水层,再通过井口排泄,是造成水井涌水的直接原因。

c. 从水文地质角度出发,综合孔隙水井涌水特征,考虑黄河水位达到 39.5 m 时作为水井涌水的警戒水位。届时需加强对大堤外侧 500 m 范围内井孔的监测,尤其是发生过涌水的水井,建议强化成井材料质量,预防因井管破损造成的涌

沙,如有必要可实施封填井口的防范措施。

参 考 文 献:

[1] 苏晨,张学庆,田夏,等. 东阿县沿黄区孔隙地下水化学特征及成因分析[J]. 水电能源科学,2022,40(2):61-65,74.

[2] 王广昊,张莹,徐亮亮,等. 衢江流域地表水与地下水的转化关系[J]. 科学技术与工程,2021,21(15):6165-6174.

[3] 毕经涛. 不退,不退——聊城黄河河务局鏖战 2021 年黄河中下游秋汛洪水纪实[J]. 黄河. 黄土. 黄种人,2022(1):38-41.

[4] 雷万达,罗玉峰,缴锡云. 黄河下游侧渗研究进展[J]. 人民黄河,2009,31(1):61-64.

[5] 李清平,崔玉兰. 黄河侧渗补给浅层地下水试验研究[J]. 水文,2004,24(2):26-30.

Mechanism of Groundwater Gushing Outside the Dike of the Lower Reaches of the Yellow River

ZHANG Xue-qing^{1,2}, SU Chen¹, LIU Lu³, MENG Su-hua^{1,2}, CUI Xiang-xiang^{1,2}

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Remediation of Hebei Province, Shijiazhuang 050061, China; 3. Geo-Environmental Monitoring Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: This study analyzed the mechanism of groundwater gushing from Quaternary boreholes at Aishan section of the lower reaches of the Yellow River in autumn floods. Groundwater level analysis, meteorological analysis, runoff analysis of the Yellow River, combined with isotopic analysis of groundwater and surface water samples were used. The results show that the average groundwater level was increased more than 3 m, which reduced the groundwater runoff. The increase of groundwater level was the basic factor of groundwater gusher. Continuous high water level of the Yellow River and the intensive water replenishment of the Yellow River to groundwater directly led to the groundwater gushing. The warning groundwater level of wells near Aishan section of the lower reaches of the Yellow River was 39.5 m within the 500 m outside the dike. This paper provides a basic understanding for preventing groundwater gushing from wells outside the levee of the Yellow River, and it is helpful for the protection of the levee of the Yellow River.

Key words: the lower reaches of the Yellow River; outside of the dike; groundwater gushing; mechanism

(上接第 73 页)

Application of HSPF Model in Flood Forecasting of Lushui Basin

MO Jun-cheng¹, HUANG Chun-fu^{2,3}, YANG Jia-liang¹, LONG Yuan-nan^{2,3}

(1. Hunan Water Resources & Hydropower Survey, Design, Planning and Research Co., Ltd., Changsha 410007, China; 2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: In recent years, rainstorm and flood disasters occur frequently in the basin. Accurate and reliable flood forecasting is an important measure to effectively prevent and resist mountain torrents. Taking Lushui basin as the research area, this paper constructed the HSPF semi-distributed model. Choosing the representative floods in the flood data of the basin from 2013 to 2020, the calibration and verification of the model parameters were carried out. The accuracy of flood simulation was evaluated by using indexes of certainty coefficient and relative error. The results show that the model has a good performance in the field flood simulation of Lushui basin. The qualified rates of peak time and peak discharge of 15 flood simulations are 100.0% and 80.0%, respectively, the qualified rates of flood volume and runoff depth are 93.3%, and the average value of certainty coefficient is 0.80. The overall prediction accuracy reaches class B, indicating that the HSPF flood prediction model has good applicability in Lushui basin. The research results can provide basis for flood forecasting in this area.

Key words: HSPF model; semi-distributed hydrological model; Lushui Basin; flood