文章编号:1000-8608(2020)05-0537-10

优选雨量站权重改进降雨输入的洪水预报方法

张金男, 吴 剑, 魏国振, 周惠成*, 彭 勇, 初京刚

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:降雨是驱动水文模型进行洪水预报的重要输入数据,降雨资料短缺给洪水预报工作 带来极大挑战.引入边缘雨量站降雨数据,基于随机优选方法,构建优选雨量站权重改进降雨 输入的新安江模型,对资料短缺流域进行洪水预测,并在石灰窑以上流域进行试验研究.与泰 森多边形权重相比,优选权重改进降雨输入的产流预报精度有显著提高,率定期、验证期产流 合格率分别从 60%、40%提高至 100%、60%,汇流预报精度略有提升;改进降雨输入后的新 安江模型的优选参数更符合流域产汇流特征,提升了模型参数的合理性.所提优选雨量站权 重改进降雨输入的洪水预报方法,对类似降雨资料短缺流域洪水预报具有重要的参考价值.

0 引 言

2003 年 7 月国际水文协会(IAHS)启动未来 10 年"PUB"(Prediction in Ungauged Basins)计 划,推动了资料短缺流域径流预报研究的快速发 展,开展了一系列重要研究并取得了相应的应用 成果[1].对于研究区域没有测站资料而周边区域 有测站资料的情况,可以基于地理相似原则从周 边地区进行移植、插值补充[2-3],或采用所属大流 域降雨数据[4] 对降雨资料进行补充. 对于研究区 域或者周边区域都没有资料的情况,可以采用相 似流域参数直接移植法[5-9]、建立地理信息数据与 水文模型参数之间的转换关系等方法确定水文模 型参数[10-13],提高水文模型的适用性.近年来,遥 感降雨数据因其探测范围广、获取数据量大、动态 监测、信息传递迅速、不受复杂地面空间条件的制 约等优点,广泛应用于资料短缺地区的水文预 报[14-15]. 但上述方法都具有一定的局限性, 插值法 对周边的雨量站空间位置要求较高,大流域降雨 数据未考虑降雨空间分布特征,遥感降雨数据具 有较高的不确定性,参数的移植会因地理特征因 子选取的不同表现出较大的差异性[16-18].

嫩江流域河流众多,水文测站分布极不均匀. 其中,上游的石灰窑以上流域的控制面积为 17 205 km²,产生的洪水是下游尼尔基水库入库 流量的重要组成部分,该流域内及周边流域的雨 量站都较少,但还是有少量周边流域的雨量站可 以利用.由于周边雨量站空间位置均位于流域南 侧,采用插值法无法准确反映流域内的降雨情况, 如何选择最适用的控制权重,充分合理地利用周 边流域测站的降雨数据,是提高石灰窑以上流域 洪水预报精度的关键.

本文针对石灰窑以上流域降雨资料短缺的情况,引入边缘雨量站降雨数据作为新安江模型的 补充降雨输入,改进目标函数,采用随机优选方法 确定雨量站最优权重,以期提高资料短缺流域的 洪水预报精度.将优选权重与泰森多边形权重的 预报结果进行对比分析,验证优选雨量站权重改 进降雨输入方法的适用性,为下游尼尔基水库的 防洪调度提供技术支撑,也为降雨资料短缺流域 的洪水预报提供借鉴.

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-07-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51879029).

作者简介: 张金男(1996-),男,硕士生,E-mail:zhangjinnan001@163.com;周惠成*(1958-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: hczhou@dlut.edu.cn.

1 方法介绍

1.1 新安江模型

对于资料短缺流域,选择合适的水文模型是 提高洪水预报精度的关键.新安江模型具有结构 简单、数据输入较少、参数可通过率定获取等优 点,广泛应用于资料短缺流域的水文预报^[16].

(1)模型框架

三水源新安江模型按其功能划分为蒸散发计 算、产流计算、分水源计算和汇流计算4个层次, 模型结构见图1.图1中输入为实测降雨量P,输 出为流域出口断面总出流 Q,方框内是状态变量, 方框外是常数值.本文通过时段降雨强度的隶属 区间,确定时段蒸发量,具体方法与文献[19]中所 述相同.

(2)参数率定

新安江模型中有 21 个参数需要确定,各参数 及参数取值范围见表 1. 其中,部分参数具有实际 物理意义,可以通过实验或实际测量确定,部分参 数物理意义不明确,难以实测获取,需要采用搜索 最优解的算法确定参数取值,以增加洪水预报编 制的科学性与效率.



图 1 新安江模型结构 Fig. 1 Structure of Xin'anjiang model

本文选用遗传算法进行参数优选,遗传算法 是依据自然界中自然选择和遗传学机理的生物进 化过程而形成的随机搜索方法.该方法具体流程 如下:随机生成一个初始化种群(新安江模型参数 组集合);计算种群中每个个体的适应度函数值, 选择、交叉、变异,产生下一代种群,循环此步骤至 进化代数;输出最优个体.本文的种群规模为 1000,进化代数为500,选择概率为0.7,交叉概 率为 0.7, 变异概率为 0.03.

1.2 雨量站权重优选方法

边缘降雨数据是降雨资料短缺流域的重要补充,符合空间临近原则^[16],但是由于其空间位置 分布不均匀,需要确定合适的权重,使计算降雨值 更加符合实际情况.随机权重优选方法通过生成 多组雨量站权重(和为1)计算时段雨量,比较每 组权重的目标函数值,优选出最佳权重组合.

表1 新安江模型参数

Tal	b. 1	Parameters	of	Xin	anjiang	mode	el
-----	------	------------	----	-----	---------	------	----

参数 种类	参数 符号	物理意义	取值范围
-#+ #L /D	$E_1 \sim E_4$	6~9月流域蒸发量等级	4.0~5.5 mm•d ⁻¹
烝 散 反	E_5	蒸发能力分级点	2.5~4.0 mm•d ⁻¹
29 XX	E_6	蒸发能力分级点	$1.0 \sim 2.5 \text{ mm} \cdot d^{-1}$
	${W}_{ m m}$	流域平均张力水容量	80~180 mm
	${U}_{ m m}$	壤中流蓄水容量	$10\sim\!20~\mathrm{mm}$
产流	$L_{ m m}$	地下径流蓄水容量	$60\!\sim\!90~\mathrm{mm}$
参数	С	深层蒸散发扩散系数	0.09~0.12
	B	蓄水容量分配曲线方次	0.2~0.5
	$I_{ m m}$	不透水面积比	0.01~0.05
	$S_{ m m}$	平均自由水蓄水容量	10~60 mm
分水	$E_{\rm x}$	自由水容量分配曲线方次	$1\!\sim\!2$
源参数	$K_{ m i}$	壤中流出流系数	0~0.7
	$K_{ m g}$	地下径流出流系数	0~0.7
	$C_{ m i}$	壤中流消退速度	0.5~0.9
<u> </u>	$C_{\rm g}$	地下径流消退速度	0.950~0.998
11. (1) (1) (2) (2) (3) (3) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4) (4	$C_{\rm s}$	地面径流消退速度	0.10~0.99
罗奴	C_{r}	河道坦化程度	$0 \sim 1$
	L	平移作用	$0\!\sim\!10~d$

(1)权重生成方法

采用拉丁超立方抽样方法从[0,1]中抽取等 同雨量站个数的样本值 $(x_1 \cdots x_i \cdots x_n)$, 由式(1)计算各站点控制权重 a_i :

$$a_i = x_i / \sum_{i=1}^n x_i \tag{1}$$

其中 n 表示雨量站个数.

(2)目标函数

评价洪水预报效果的目标函数有产流合格 率、汇流合格率、产流相对误差、洪峰相对误差、峰 现时间绝对误差和确定性系数,属于多目标问题. 本文选用线性权重法进行多目标问题的求解.线 性权重法是一种根据各分目标的重要程度设置相 应的权系数,然后以其线性加权组合作为综合目 标函数进行寻优的求解多目标问题的方法.该方 法结构简单、可操作性高,适用于目标函数较少的 优化问题^[20-21],一般式见式(2).实际上,只采用产 汇流合格率作为评价指标,优化过程中综合目标 函数会出现跳跃现象,且会出现多个个体的最优 综合目标函数值相同的情况,导致参数率定陷入 丢失方向的状态,不利于模型参数优化.本文将产 汇流合格率与产流相对误差等灵敏指标相结合, 采用线性权重法将上述多目标优化问题转化为单 目标优化问题进行求解.具体应结合防洪工程实 际需求确定分目标函数及权系数,如以河道防洪 为主,应侧重考虑峰现时间绝对误差和洪峰相对 误差;若为下游水库调度提供依据,应侧重关注反 映洪量误差的产流相对误差.

$$F(x) = \max_{x \in X} \sum_{a=1}^{K} w_a f_a(x)$$
(2)

式中: $w_{\alpha} \ge 0$ ($\alpha = 1, 2, \dots, K$)为权系数,且 $\sum_{\alpha=1}^{K} w_{\alpha} = 1$:K 为分目标个数:X 为自变量 x 的取值范围.

(3)终止条件

在权重优选过程中,实时保存并更新前3位 综合目标函数值及对应参数,当循环次数达到既 定次数或前3位最优综合目标函数值中相邻两值 相差小于0.1,停止优选.

1.3 雨量站权重与新安江模型参数的优选

首先,选取流域内及流域边缘雨量站降雨数 据,组成降雨系列数据,见式(3);然后,采用随机 权重生成方法生成权重组合(*a*₁ … *a_i* … *a_n*),根据式(4)计算第*k*时段降雨量*P_k*,得到时 段降雨量系列数据*P*,见式(5),将*P*作为三水源 新安江模型的输入进行参数率定,循环此步骤,保 留前3位最优综合目标函数值;最后,当达到终止 条件时,输出前3位最优综合目标函数值及对应 参数集、权重组合.具体模型框架见图2.



图 2 优选雨量站权重的新安江模型框架 Fig. 2 The framework of improved Xin'anjiang model by optimizing the weights of rainfall stations

$$\boldsymbol{P}_{0} = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & P_{mn} \end{pmatrix}$$
(3)

$$P_k = \sum_{i=1}^n (P_{ki} \times a_i) \tag{4}$$

 $\boldsymbol{P} = (P_1 \quad \cdots \quad P_k \quad \cdots \quad P_m)^{\mathrm{T}}$ (5) 其中 *n* 为雨量站个数,*m* 为降雨时段数.

2 实例分析

2.1 研究区概况

尼尔基水利枢纽位于黑龙江省与内蒙古自治 区交界的嫩江干流上,距下游工业重镇齐齐哈尔 市约189 km,如图3所示.尼尔基水利枢纽工程 是以齐齐哈尔市、大庆市及哈尔滨市防洪、城镇生 活和工农业供水为主,结合发电,兼有改善下游航 运和水环境,并为松辽地区水资源的优化配置创 造条件的大型控制性工程.其中防洪功能尤为重 要,自2006年12月底工程竣工后,齐齐哈尔市防 洪标准由50 a一遇提高到100 a一遇,枢纽至齐 齐哈尔河段的防洪标准由20 a一遇提高到50 a 一遇提高到50 a一遇.





尼尔基水库以上流域面积为 66 382 km²,约 占整个嫩江流域面积的 23%,该流域的降水主要 集中在夏季,多年平均降水量为 500 mm.根据支 流分布,尼尔基水库以上流域的主要降雨区包括 石灰窑以上流域、多布库尔河流域、甘河及阿里河 流域、门鲁河流域及科后河流域.其中,石灰窑以 上流域的面积为 17 205 km²,约占尼尔基水库以 上流域面积的 26%,所产生洪水是尼尔基水库入 库洪水的重要组成部分,提高该流域的洪水预报 精度,对提高尼尔基水库以上流域洪水预报精度 和尼尔基水库防洪预报调度水平有重要意义.但 石灰窑以上流域的水文测站密度是尼尔基水库以 上流域的子流域中最稀少的,流域内只含卧都河、 石灰窑两个测站,流域外边界附近有新天、壮志、 松岭和罕达气 4 个测站.

2.2 数据集

收集到石灰窑以上流域石灰窑水文站的日降 雨数据和日流量数据,5个雨量站的日降雨数据, 包括卧都河、松岭、新天、壮志、罕达气,各测站具 体分布见图 3,所处河流及资料起止时间、测站类 型见表 2.选择 1980~2014 年间 15 场较大洪水 作为研究样本,场次洪水净雨深、洪峰等特征值见 表 3. 从表 3 中可以看出,15 场洪水的洪峰流量占 尼尔基入库洪峰流量的比例较高,在 0. 19~ 0.52,进一步说明该流域所产生洪水是尼尔基水 库入库洪水的重要组成部分.

- 表 2 石灰窑以上流域及边界附近水文站及 雨量站基本信息
- Tab. 2 Basic information of hydrological stations and rainfall stations within or near the Shihuiyao basin

序号	测站	类型	所处河流	年份
1	石灰窑	水文站	嫩江干流	$1954\!\sim\!2014$
2	松岭	雨量站	多布库尔河	$1973 \sim 2014$
3	卧都河	雨量站	嫩江干流	1979~1980, 1982~1992, 2007~2013
4	新天	雨量站	查拉巴奇河	$1983 \sim 2009$
5	壮志	雨量站	多布库尔河	$1974\!\sim\!2014$
6	罕达气	雨量站	泥鳅河	1980~2002、 2004~2014

2.3 新安江模型参数率定与雨量站权重优选

2.3.1 泰森多边形权重下新安江模型参数率定 (1)综合目标函数的构建

石灰窑子流域是尼尔基水库以上流域的最大 子流域,所产洪水洪量是尼尔基水库防洪预报调 度的重要指标,关系到尼尔基水库下游人民群众 的生命财产安全.考虑石灰窑子流域的实际情况,

表 3 石灰窑以上流域场次洪水

Tab 3	Collected	flood	events	in	the	Shihuiyao	basin
1 40.0	Concercu	11000	Cv Chito	111	the	Omnuryao	Daom

洪号	净雨深/mm	峰现时间	洪峰流量 $M_i/(m^3 \cdot s^{-1})$	尼尔基入库洪峰流量 $M/(m^3 \cdot s^{-1})$	M_i/M
19800716	29.2	1980-07-22	690	2 080	0.33
19840730	47.7	1984-08-02	1 740	3 330	0.52
19840808	30.2	1984-08-10	810	3 330	0.24
19850812	17.1	1985-08-15	440	_	_
19860811	17.8	1986-08-15	470	—	_
19880806	78.1	1988-08-10	2 770	6 170	0.45
19890717	75.4	1989-07-25	1 200	5 170	0.23
19900706	28.3	1990-07-14	740	2 560	0.29
19920905	38.3	1992-09-11	870	2 840	0.31
19980615	88.6	1998-06-25	1 430	6 900	0.21
19990905	36.5	1999-09-09	930	2 420	0.38
20060719	33.5	2006-07-26	840	2 170	0.39
20090817	16.2	2009-08-22	390	—	_
20100803	37.9	2010-08-13	670	1 990	0.34
20130805	68.5	2013-08-12	1 460	7 740	0.19

采用两种综合目标函数,其中综合目标函数 $F_1(x)$ 仅考虑产汇流的合格场次,见式(6);综合 目标函数 $F_2(x)$ 选用产汇流合格场次、产流相对 误差和确定性系数,见式(7),各分目标函数及权 系数见表 4.

$$F_{1}(x) = \max \sum_{j=1}^{N} (0.5f_{1j}(x) + 0.5f_{2j}(x)) \quad (6)$$

$$F_{2}(x) = \max \sum_{j=1}^{N} (0.25f_{1j}(x) + 0.25f_{2j}(x) + 0.25f_{3j}(x) + 0.25f_{6j}(x)) \quad (7)$$

其中 N 为洪水场次.

(2)参数率定

将边缘雨量站降雨数据作为补充,以泰森多 边形权重计算面雨量作为输入,分别以式(6)、(7) 为综合目标函数,采用三水源新安江模型对石灰 窑以上流域选定的 15 场洪水进行预报,其中前 10 场为率定期,后 5 场为验证期,泰森多边形权 重见表 5,参数优选结果见表 6.

2.3.2 随机优选法确定雨量站权重 基于随机 权重生成法生成 500 组权重,以 F₂(x)为综合目 标函数(式(7)),不同雨量站权重组合下综合目标 函数值分布见图 4,图中横坐标为权重组数,纵坐 标为对应综合目标函数值,红圈代表前 3 组最优

表4 分目标函数表达式及权系数

Tab. 4 Sub-objective functions' expressions and weights

特征值	函数表达式	w_{F_1}	w_{F_2}
产流合 格场次	$f_{1j}(x) = \operatorname{IF}[f_{3j}(x) \ge 0.8, 1, 0]$	0.5	0.25
汇流合 格场次	$f_{2j}(x) = \text{IF}[(f_{4j}(x) \leq 1, f_{5j}(x) \geq 0.8, f_{6j}(x) \geq 0.8), 1, 0]$	0.5	0.25
产流相 对误差	$f_{3j}(x) = 1 - \left \frac{R_j - R_{0j}}{R_{0j}} \right $	_	0.25
峰现时 间绝对 误差	$f_{4j}(x) = T_j - T_{0j} $	_	_
洪峰相 对误差	$f_{5j}(x) = 1 - \left \frac{M_j - M_{0j}}{M_{0j}} \right $	_	_
确定性 系数	$f_{6j}(x) = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{m} (Q_{jk} - Q_{0jk})^2}{\sum_{k=1}^{m} (Q_{0jk} - \overline{Q}_j)^2}$	_	0.25
注,表中	中 m 为 每 场 洪 水 的 时 段 数 : R: 为 预 报 径 流 深	R_{0i}	为实

注:表中 *m* 为每场洪水的时段数; R_j 为预报径流深, R_{0j} 为实 测径流深, mm; T_j 为预报峰现时间, T_{0j} 为实际峰现时间, d; M_j 为预报洪峰流量, M_{0j} 为实测洪峰流量, $m^3 \cdot s^{-1}$; Q_{jk} 为预报径流量, Q_{0jk} 为实测径流量, $\overline{Q_j}$ 为实际流量过程均 值, $m^3 \cdot s^{-1}$; w_{F_1} 表示综合目标函数 $F_1(x)$ 的权系数组合, w_{F_2} 表示综合目标函数 $F_2(x)$ 的权系数组合.

表 5 泰森多边形权重及优选权重

Tab. 5 Weights from Thiessen polygon and random optimization methods

祖人	权重										
纽百	石灰窑	卧都河	松岭	新天	壮志	罕达气					
泰森多边形权重	16.44	55.46	15.77	11.50	0	0.83					
优选权重1	25.81	26.34	22.40	5.44	11.49	8.53					
优选权重 2	24.69	22.72	25.68	6.19	9.30	11.42					
优选权重 3	27.97	28.23	29.02	7.43	6.91	0.43					

表 6 综合目标函数 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 参数优选结果及优选权重参数优选结果

Tab. 6 Optimal parameters of sum-objective function $F_1(x)$, $F_2(x)$ and optimal weights

组合	目标函数	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	${W}_{ m m}$	U_{m}	$L_{\rm m}$	С	В	$I_{ m m}$
泰森多边	$F_1(x)$	4.02	4.00	4.01	5.5	2.5	1.89	89.38	13.52	60.45	0.10	0.42	0.02
形权重	$F_2(x)$	4.00	4.00	5.42	5.5	2.5	1.83	89.16	15.05	61.88	0.12	0.50	0.03
优选权重1	$F_2(x)$	4.00	4.00	5.49	5.5	2.5	1.04	101.98	18.05	60.03	0.12	0.50	0.05
组合	目标函数	$S_{ m m}$		$E_{\rm x}$		$K_{\rm g}$		$C_{\rm i}$	$C_{\rm g}$	С	s	$C_{\rm r}$	L
泰森多边	$F_1(x)$	53.95	1	. 80	0.52	0.18	3	0.85	0.99	0.	54	0.21	3
形权重	$F_2(x)$	59.01	1	. 02	0.53	0.53 0.17		0.77 0.97		0.98		0.31	3
优选权重1	$F_2(x)$	52.51	1	.91	0.69	0.01	0.01 0.81		0.95 0.92		92	0.52	4

的权重,具体取值见表 5. 由表 5 和图 4 中可以看出,优选权重 1~3 的分布趋势大致相同,综合目标函数值相差较小,故选取最优的优选权重 1 的预报结果进行评价分析,其参数组合见表 6.



图 4 综合目标函数值分布



2.4 预报结果分析

2.4.1 泰森多边形法确定雨量站权重的预报结 果分析 表 7 为泰森多边形权重下分别以 $F_1(x)$ 、 $F_2(x)$ 为综合目标函数的预报结果, $F_2(x)$ 的率定期产流合格率为 60%,高于 $F_1(x)$ 的 50%, 且 $F_2(x)$ 的率定期与验证期的产流相对误 差、洪峰相对误差、确定性系数均值均优于 $F_1(x)$,说明考虑合格场次结合产流相对误差及 确定性系数的综合目标函数 $F_2(x)$ 的产汇流模拟

表 7 泰森多边形权重下综合目标函数 F₁(x)、 F₂(x)预报结果

Tab. 7 Predicted results of sum-objective function $F_1(x)$, $F_2(x)$ under Thiessen polygon weights

目标 函数	0 .1 #8	合柞	各率	均值						
	叫朔	产流/%	汇流/%	$\Delta R/\%$	$\Delta Q_{ m m}/\%$	$N_{\rm s}$				
$F_1(x)$	率定	50	70	32.9	17.2	0.842				
	验证	40	20	29.9	24.0	0.804				
$F_2(x)$	率定	60	70	27.6	16.3	0.856				
	验证	40	20	25.6	17.4	0.818				

注:径流深相对误差均值、洪峰相对误差均值是对每场洪水的 相应指标取绝对值后再求的平均值;ΔR 为径流深相对误 差,%;ΔQ_m 为洪峰相对误差,%;N_s 为确定性系数,量纲 一.

效果更贴近实际情况.

2.4.2 随机优选法确定雨量站权重的预报结果 分析 从表5中可以看出,泰森多边形权重中卧 都河站占比约为55%,在流域面雨量计算中起决 定性作用,而壮志站权重为0,缺乏合理性.通过 权重随机优选后,卧都河站的权重从55%下降到 23%~28%,壮志站权重由0增加至7%~11%. 在率定期,优选权重的综合目标函数值在8.36以 上,明显高于泰森多边形权重的6.91,说明率定 期优选权重整体产汇流精度优于泰森多边形权

%

重,更适合反映石灰窑以上流域的实际降雨分布. 从优选权重数值上看,石灰窑以上流域的降雨主 要受卧都河、石灰窑和松岭控制,东部的罕达气影 响较小.

尼尔基水库对洪水的调节能力较强,入库洪 量对水库的洪水调度起着决定性作用.因此,相比 汇流预报(洪峰与洪水过程),提高产流预报即洪 量预报精度更为重要.表8为泰森多边形权重与 优选权重的预报结果对比,按表4定义的产汇流 合格标准进行判定,在率定期,泰森多边形权重的 产汇流合格率分别为60%、70%,优选权重的产 汇流合格率分别为100%、60%;在验证期,泰森 多边形权重的产汇流合格率分别为40%、20%, 优选权重的产汇流合格率均为60%.优选权重减 小了产流相对误差,提高了洪水预报精度,表明优 选权重计算的面雨量更接近实际情况,能够更准 确预报出洪水实际过程.从均值可以看出,优选权 重可以明显改进产流预报的精度,但对汇流预报 的改进并不明显,原因是汇流过程主要通过参数 控制,权重只能通过改变产流量间接影响汇流预 报效果.对于洪量较大的洪水,如19880806、 19890717、19980615、20130805场次洪水,预报结 果见图5,可以看出优选权重的产流预报精度较 高,可为下游水库调度提供较好的依据.原因是大 范围的致洪降雨面积较广,边缘降雨与流域内的 降雨具有较高的一致性.

此外,基于优选权重预报的初始土壤含水量 普遍高于泰森多边形权重,说明前者流域状态更 加湿润,更符合新安江模型蓄满产流机制.从表 6 可以看出,相比于泰森多边形的参数优选结果,优 选权重的参数优选结果中变化较大且敏感的参数 是 K_i,参数值为 0.69,反映出优选权重预报径流 中壤中流出流占比较大、深层地下径流占比较小, 符合石灰窑以上流域森林覆盖面积较大、表层土 壤渗透性较好的特点,表明优选权重可以改进模 型参数,使之更符合流域特点.

表 8 泰森多边形权重与优选权重预报结果

- 1			实测			Ż	泰森多边形权	重						优选权重1			
期	洪号	R/ mm	$\frac{Q_{\rm m}}{({\rm m}^3\cdot{\rm s}^{-1})}$	W ₀ / mm	R/ mm	$\Delta R/\%$	$Q_{\rm m}/$ (m ³ • s ⁻¹)	$\Delta Q_{ m m}/\%$	$\Delta T/\mathrm{d}$	$N_{\rm s}$	W ₀ / mm	R/ mm	$\Delta R/\%$	$\frac{Q_{\rm m}}{({\rm m}^3\cdot{\rm s}^{-1})}$	$\Delta Q_{ m m}$ / $\%$	$\Delta T/\mathrm{d}$	$N_{\rm s}$
	19800716	29.2	690	38.1	29.8	2.0	640	-6.9	0	0.89	49.7	33.6	15.0	690	-0.7	0	0.96
率定期	19840730	47.7	1 740	71.7	83.9	75.9	1 580	-8.9	0	0.84	78.6	52.3	9.8	880	-49.6	2	0.54
	19840808	30.2	810	83.7	49.6	64.3	1 180	46.1	1	0.75	95.5	33.7	11.7	800	-0.8	2	0.82
	19850812	17.1	440	58.7	15.7	-8.2	310	-29.2	0	0.70	73.1	15.0	-12.3	290	-34.4	1	0.70
	19860811	17.8	470	66.6	16.2	-8.7	430	-8.8	0	0.91	77.7	15.6	-12.4	390	-16.8	1	0.91
	19880806	78.1	2 770	67.6	104.8	34.2	2 490	-10.1	-1	0.94	77.4	75.1	-3.8	1 770	-35.9	0	0.75
	19890717	75.4	1 200	53.4	65.4	-13.2	1 110	-8.2	-1	0.82	64.7	70.7	-6.2	1 200	-0.6	0	0.95
	19900706	28.3	740	26.0	42.2	49.1	830	12.3	1	0.91	37.4	29.8	5.3	610	-17.5	0	0.95
	19920905	38.3	870	61.6	44.5	16.2	980	12.7	-2	0.93	71.6	43.6	13.8	980	12.2	-1	0.94
	19980615	88.6	1 430	54.1	84.9	-4.1	1 710	19.5	0	0.87	62.4	77.1	-13.0	1 500	4.6	1	0.86
	19990905	36.5	930	69.9	48.8	33.9	1 170	25.9	-1	0.78	72.6	43.1	18.3	1 020	9.2	0	0.91
验	20060719	33.5	840	41.2	50.1	49.8	1 130	34.5	-1	0.78	51.3	46.0	37.3	1 030	22.7	0	0.71
证	20090817	16.2	390	43.5	17.8	9.9	380	-4.5	0	0.89	46.2	16.0	-1.1	350	-10.8	1	0.94
期	20100803	37.9	670	71.4	43.1	13.6	640	-4.4	-2	0.82	55.9	25.9	-31.7	380	-42.3	-1	0.65
	20130805	68.5	1 460	82.5	54.3-	-20.8	1 210	-17.5	-2	0.82	91.2	68.0	-0.7	1 560	6.3	-1	0.97

Tab. 8 Predicted results of Thiessen polygon and random optimization methods

注:径流深相对误差均值、洪峰相对误差均值是对每场洪水的相应指标取绝对值后再求的平均值;R为径流深,mm; Q_m 为洪峰流量,m³ · s⁻¹; W_0 为初 始含水量,mm; ΔR 为径流深相对误差,%; ΔQ_m 为洪峰相对误差,%; ΔT 为峰现时间绝对误差.d; N_s 为确定性系数,量纲一.



Fig. 5 Forecast results of 19880806, 19890717, 19980615, 20130805 flood events

3 结 论

(1)对比仅以产汇流合格场次作为综合目标 函数的预报结果,以合格场次、产流相对误差和确 定性系数为综合目标函数可以提高洪水预报精 度.

(2)优选雨量站权重改进降雨输入的新安江 模型的产流合格率在率定期和验证期分别为 100%、60%,比泰森多边形法分别提高了40%、 20%;汇流合格率在率定期和验证期均为60%, 整体洪水预报效果优于泰森多边形法.优选雨量 站权重改进降雨输入的洪水预报方法能够显著提 高降雨资料短缺流域产流预报精度,可为下游水 库的预报调度提供可靠依据.

(3)对比泰森多边形法的预报结果,优选雨量站权重改进降雨输入的方法通过对边缘降雨的合理分配,使流域初始含水量普遍提高,壤中流出流系数 K_i更加合理,使预报模型参数更加合理.

(4)对于大范围的致洪降雨,边缘降雨数据的 代表性较高,可以通过优选雨量站权重提高洪水 预报精度,为下游洪水调度提供较好的依据;当致 洪降雨为局部小范围降雨,边缘降雨数据代表性 较差,计算所得面雨量不一定能反映流域真实降 雨情况,未来可补充遥感、雷达等多源降雨数据, 以进一步提高资料短缺流域的洪水预报精度.

参考文献:

- [1] SIVAPALAN M, TAKEUCHI K, FRANKS S W, et al. IAHS decade on predictions in ungauged basins (PUB), 2003-2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences [J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(6): 857-880.
- [2] 林忠辉,莫兴国,李宏轩,等. 中国陆地区域气象 要素的空间插值 [J]. 地理学报,2002,57(1):47-56.

LIN Zhonghui, MO Xingguo, LI Hongxuan, *et al*. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, **57**(1): 47-56. (in Chinese)

[3] WEI Guozhen, TYCH W, BEVEN K, et al. Nierji reservoir flood forecasting based on a data-based mechanistic methodology [J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 227-237.

[4] 刘春春,刘万青,王 宁,等. SCS 模型在无资料
 地区径流模拟估算中的应用——以清河流域为
 例[J].中国农业资源与区划,2019,40(12):56-63.

LIU Chunchun, LIU Wanqing, WANG Ning, et al. Application of SCS model in runoff simulation of non-data region—a case study in Qinghe River basin [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(12): 56-63. (in Chinese)

[5] 金倩芳,周建中,严 冬,等. TOPMODEL 模型 在长江上游无资料地区的水文模拟[J].水电能源 科学,2018,36(9):44-47.

> JIN Qianfang, ZHOU Jianzhong, YAN Dong, et al. Hydrological simulation of TOPMODEL model in ungauged basin of the upper reaches of the Yangtze River [J]. Water Resources and Power, 2018, **36**(9): 44-47. (in Chinese)

- [6] 宋昭义. 新安江模型在无资料流域冷水河的应用研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S2): 488-492.
 SONG Zhaoyi. Xin' an River model application research in the absence data of Lengshui River basin [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(S2): 488-492. (in Chinese)
- [7] 伍远康,王红英,陶永格,等.浙江省无资料流域 洪水预报方法研究 [J].水文,2015,35(6):24-29.

WU Yuankang, WANG Hongying, TAO Yongge, et al. Flood prediction in ungauged basins of Zhejiang province [J]. Journal of China Hydrology, 2015, **35**(6): 24-29. (in Chinese)

- [8] 柴晓玲,郭生练,彭定志,等. IHACRES 模型在无资料地区径流模拟中的应用研究[J]. 水文,2006,26(2):30-33,21.
 CHAI Xiaoling, GUO Shenglian, PENG Dingzhi, et al. A study on the application of IHACRES model in runoff simulation in ungauged basins [J].
 Journal of China Hydrology, 2006, 26(2): 30-33,
- [9] MERZ R, BLÖSCHL G. Regionalisation of catchment model parameters [J]. Journal of Hydrology, 2004, 287(1/2/3/4): 95-123.

21. (in Chinese)

[10] ECREPONT S, CUDENNEC C, ANCTIL F,

et al. PUB in Québec: A robust geomorphologybased deconvolution-reconvolution framework for the spatial transposition of hydrographs [J]. Journal of Hydrology, 2019, **570**: 378-392.

- [11] 李致家,梁 珂,阚光远,等.新安江模型中河网 汇流参数 Cs 的一种计算方法 [J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 652-661.
 LI Zhijia, LIANG Ke, KAN Guangyuan, et al. A method for deriving the river network flow concentration parameter Cs of the Xin' anjiang model [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 652-661. (in Chinese)
- [12]张 婷,冯 平.基于 DEM 的资料短缺地区设计 洪水推求 [J].中国工程科学,2011,13(12):68-73.

ZHANG Ting, FENG Ping. Design flood of ungauged basins based on DEM [J]. Strategic Study of CAE, 2011, 13(12): 68-73. (in Chinese)

[13] 张建云,何 惠.应用地理信息进行无资料地区流 域水文模拟研究 [J].水科学进展,1998,9(4): 345-350.

ZHANG Jianyun, HE Hui. Study on runoff modeling in non-data watershed using georeferenced data [J]. Advances in Water Science, 1998, 9(4): 345-350. (in Chinese)

- [14] 刘江涛,徐宗学,赵 焕,等. 基于改进降水输入 模块的融雪径流模拟:以拉萨河为例 [J]. 水利学 报,2018,49(11):1396-1408.
 LIU Jiangtao, XU Zongxue, ZHAO Huan, *et al.* Simulation of snowmelt runoff processes based on enhanced precipitation input module: Case studies in the Lhasa River basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49 (11): 1396-1408. (in Chinese)
- [15] THOM V T, KHOI D N, LINH D Q. Using gridded rainfall products in simulating streamflow in a tropical catchment - A case study of the Srepok River Catchment, Vietnam [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2017, 65(1): 18-25.
- [16] 于瑞宏,张字瑾,张笑欣,等.无测站流域径流预测区域化方法研究进展[J].水利学报,2016, 47(12):1528-1539.

YU Ruihong, ZHANG Yujin, ZHANG Xiaoxin, et al. Review of regionalization methods on streamflow prediction in ungauged basins [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (12): 1528-1539. (in Chinese)

[17] 刘昌明,白 鹏,王中根,等.稀缺资料流域水文 计算若干研究:以青藏高原为例 [J].水利学报, 2016,47(3):272-282.

LIU Changming, BAI Peng, WANG Zhonggen, *et al*. Study on prediction of ungauged basins: A case study on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 272-282. (in Chinese)

 [18] 刘苏峡,刘昌明,赵卫民.无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J].地理科学进展,2010, 29(11):1333-1339.

> LIU Suxia, LIU Changming, ZHAO Weimin. Towards the methodology for predictions in ungauged basins [J]. **Progress in Geography**, 2010, **29**(11): 1333-1339. (in Chinese)

- [19] 温雪营. 碧流河流域洪水预报调度研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
 WEN Xueying. Research of the flood forecasting and dispatching of Biliuhe basin [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [20] 郝增超,尚松浩.基于栖息地模拟的河道生态需水量多目标评价方法及其应用[J].水利学报,2008, 39(5):557-561.
 HAO Zengchao, SHANG Songhao. Multi-objective assessment method based on physical habitat simulation for calculating ecological river flow demand [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5): 557-561. (in Chinese)
- [21] GUO Xuning, HU Tiesong, ZHANG Tao, et al. Bilevel model for multi-reservoir operating policy in inter-basin water transfer-supply project [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424: 252-263.

Method of flood forecasting based on rainfall input improvement by optimizing rainfall stations' weights

ZHANG Jinnan, WU Jian, WEI Guozhen, ZHOU Huicheng*, PENG Yong, CHU Jinggang

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Rainfall is an important input variable to drive hydrological models used for flood forecasting. The lackness of rainfall data brings a great challenge to flood forecasting. A method of flood forecasting for ungauged basin is proposed, in which the measured data of several rainfall stations within the neighboured basin is collected and used as additional input to Xin'anjiang model. The optimal weights of rainfall stations are determined by using random optimization algorithm. The new method is tested in the Shihuiyao basin. Runoff results from the optimized weights have higher precision than the calculated weights from Thiessen polygon method. The calculated qualified rates of runoff results during training and validation stages are largely improved from 60%, 40% to 100%, 60%, respectively. The calculated qualified rates of concentration results are slightly improved. The optimal parameters of the Xin'anjiang model are more suitable for the actual situation of rainfall-runoff process within the selected basin, which can improve the reasonability and practicality of hydrological model. The proposed flood forecasting method can provide valuable references for similar ungauged basins.

Key words: ungauged basin; Xin'anjiang model; flood forecasting; optimal rainfall stations' weights