

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221739

# 降雨误差微分响应岭估计方法在建阳流域洪水预报误差修正的应用

杨姗姗<sup>1</sup>, 程 锐<sup>2</sup>, 颜文珠<sup>1</sup>, 张 乾<sup>3</sup>

(1. 中国水利学会, 北京 100053; 2. 中国南水北调集团有限公司, 北京 100036;  
3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

**摘要:** 为提高面平均雨量资料的准确性,在动态系统响应曲线修正方法基础上,针对修正效果可能不稳定的问题,引入岭估计方法,基于最小二乘岭估计构建一种新修正方法。将新安江模型计算概化为一个系统,并将该方法应用于建阳流域洪水预报误差修正,对该流域 37 场历史洪水进行修正效果检验,进一步验证该方法在实际流域洪水预报误差修正应用的有效性。结果表明,降雨误差微分响应岭估计方法在该流域洪水预报误差修正应用效果较好,能够有效提高洪水预报精度,方法修正效果较为明显。

**关键词:** 误差修正; 降雨误差; 岭估计; 新安江模型

**中图分类号:** [TV124]; P338

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)07-0001-04

## 1 概况

建阳位于福建省北部,所在河流隶属闽江上游建溪水系,冬短夏长,气候宜人,静风多,温差大,雨季集中。年平均气温 18 °C,年平均降雨量为 1 700~2 400 mm。建阳站控制面积为 4 848 km<sup>2</sup>,多年平均流量为 187 m<sup>3</sup>/s。建阳流域内共有 1 个蒸发站,17 个雨量站,预报站为建阳。图 1 为建阳流域水系分布图。建阳流域属于典型的湿润地区,降雨径流关系具有蓄满产流的特点。为提高面平均雨量资料的准确性,在动态系统响应曲线修正方法<sup>[1]</sup>基础上,针对修正效果不稳定的问题,引入岭估计方法<sup>[2]</sup>,构建基于最小二乘岭估计的动态系统响应曲线修正方法<sup>[3]</sup>,即将降雨误差微分响应岭估计方法应用于建阳流域洪水预报

误差修正,并探讨修正前后洪量、洪峰预测结果,进一步验证了该方法在实际流域洪水预报误差修正方面应用的有效性。

## 2 研究方法

动态系统响应曲线(DSRC)修正方法是一种基于物理基础,向信息源头追溯的反馈修正模型<sup>[1]</sup>。降雨误差微分响应岭估计方法从降雨误差估计角度出发,在动态系统响应曲线修正方法的基础上,针对最小二乘估计引起的共线性问题,基于最小二乘岭估计提出的一种新方法<sup>[3]</sup>。该方法将新安江模型计算概化成一个系统,利用出口断面流量误差信息,计算逐时段降雨引起的系统微分响应来反演估计降雨误差,将修正后的降雨重新代入模型计算,修正出口断面流量。降雨误差微分响应岭估计方法及其修正过程<sup>[3]</sup>具体如下。

**步骤 1** 用新安江模型计算出口断面流量。计算式为:

$$Q_{Ct} = f(P_t) \quad (1)$$

式中, $Q_{Ct}$  为  $t$  时刻的计算流量; $P_t$  为  $t$  时刻降雨系列; $f(P_t)$  为关于降雨的系统响应函数。

**步骤 2** 计算实测流量与计算流量误差  $E_Q$ :

$$E_Q = Q_O - Q_C \quad (2)$$

式中, $Q_O$  为实测流量; $Q_C$  为计算流量。

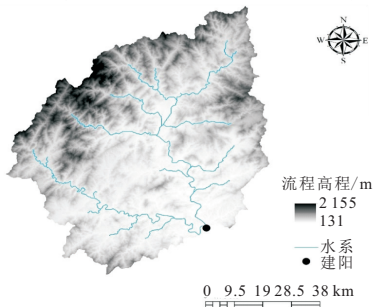


图 1 建阳流域水系分布

Fig. 1 Distribution map of water system in Jianyang Basin

收稿日期: 2022-08-22, 修回日期: 2022-09-22

基金项目: 水利部水资源节约项目(12622400000190004); 中国特色一流学会建设项目(2021610)

作者简介: 杨姗姗(1990-), 女, 工程师, 研究方向为水文物理规律模拟、水文预报, E-mail: yangss\_90@163.com

**步骤 3** 计算降雨误差微分响应  $U$ 。确定需要修正的降雨量时段  $m$ , 对每个时段降雨  $P_i (i = 1 \sim m)$  依次增加一个单位的降雨量, 其他时段降雨量不变, 得到新降雨系列, 将其代入模型计算后得到新流量过程, 减去原降雨量系列计算得到的流量过程, 得到时段降雨  $P_i$  对应的系统响应列  $U_i$ , 由此求得系统响应:

$$U_i = \left[ \frac{\partial f(P_1)}{\partial P_i}, \dots, \frac{\partial f(P_j)}{\partial P_i}, \dots, \frac{\partial f(P_L)}{\partial P_i} \right]^T \quad (3)$$

$i = 1 \sim m; j = 1 \sim L$

式中,  $\partial f(P_j)/\partial P_i$  为  $i$  时刻降雨系列流量引起的微分响应。

**步骤 4** 给定不同的岭系数、通过试算和作图, 确定最优岭系数  $\beta$ 。

**步骤 5** 利用最小二乘岭估计, 计算降雨误差岭估计  $E_P$ :

$$E_P = (U^T U + \beta I)^{-1} U^T E_Q \quad (4)$$

**步骤 6** 计算误差修正后的降雨系列  $P_{XZ}$ :

$$P_{XZ} = P + E_P \quad (5)$$

式中,  $P$  为误差修正前的降雨系列。

**步骤 7** 将修正后的降雨系列重新代入模型计算得修正流量过程  $Q_{XZ}$ :

$$Q_{XZi} = f(P_{XZi}) \quad (6)$$

判断目标函数是否满足条件, 若不满足, 则转至步骤 2; 否则停止循环修正。为可靠衡量岭估计的精度, 采用均方误差 ( $M_{MSE}$ ) 为目标函数:

$$M_{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^L (Q_{Oi} - Q_{XZi})^2} \quad (7)$$

式中,  $Q_{XZi}$  为引入岭系数后  $i$  时刻的修正流量;  $L$  为次洪时段数。

### 3 应用与检验

#### 3.1 评价指标

为检验修正方法的适应性、有效性及修正方法的效果, 选取洪量相对误差  $\Delta R$ 、洪峰相对误差  $\Delta Q_p$ 、纳什系数  $N_{NS}$ 、相对有效性系数  $R_{REC}$  共 4 个指标来评价方法的有效性。其中相对有效性系数  $R_{REC}$  计算公式为:

$$R_{REC} = 1 - \frac{\sum_n (Q_{On} - Q_{XZn})^2}{\sum_n (Q_{Cn} - Q_{On})^2} \quad (8)$$

式中,  $Q_{Cn}$ 、 $Q_{On}$ 、 $Q_{XZn}$  分别为第  $n$  时刻的计算流量、实测流量、修正流量。

$R_{REC}$  表示修正的相对有效性<sup>[4]</sup>, 相对有效性系数越大, 说明修正方法的效果越明显, 其最大值

为 1。

#### 3.2 岭系数的确定

选取建阳流域 1988~1999 年间共 37 场历史洪水资料进行检验分析, 新安江模型参数由人机交互率定得到, 见表 1。所有参数在计算和修正过程中保持不变。

表 1 建阳流域新安江模型参数

Tab. 1 Xin'anjiang model parameters in Jianyang Basin

参数	取值	参数	取值	参数	取值
K	0.98	C	0.16	C <sub>CI</sub>	0.83
W <sub>WM</sub>	150	S <sub>SM</sub>	15	C <sub>CG</sub>	0.99
W <sub>WUM</sub>	20	E <sub>EX</sub>	1.5	K <sub>KE</sub>	1
W <sub>WLM</sub>	80	K <sub>KI</sub>	0.28	X <sub>XE</sub>	0.4
W <sub>WDM</sub>	50	K <sub>KG</sub>	0.42		
B	0.25	C <sub>CS</sub>	0.63		

给定不同范围的岭系数 (0.01~1.5), 以岭系数尽可能小, 且不明显增加偏度而又大大减小误差为原则。不同岭系数评价效果见表 2, 将不同岭系数计算得均方误差及循环次数作图, 见图 2。综合分析表 2、图 2, 通过试算及作图法综合确定建阳流域的岭系数  $\beta$  为 1.0。表 2 中,  $\Delta R$  为洪量相对误差, %;  $\Delta Q_p$  为洪峰相对误差, %;  $N_{NS}$  为流量纳什系数;  $X_{XHCS}$  为循环次数。

表 2 建阳流域不同岭系数效果

Tab. 2 Effect of different ridge coefficients in Jianyang Basin

$\beta$	$\Delta R$	$\Delta Q_p$	$N_{NS}$	$M_{MSE}$	$X_{XHCS}$
0.00	12.0	12.6	0.710	96 531	
0.01	12.1	11.8	0.761	76 107	2.8
0.05	11.1	9.6	0.801	63 241	6.9
0.10	10.7	8.2	0.816	57 396	9.0
0.50	9.4	6.7	0.856	46 509	19.4
1.00	9.4	5.6	0.874	40 988	26.4
1.50	10.2	5.6	0.875	40 885	25.1

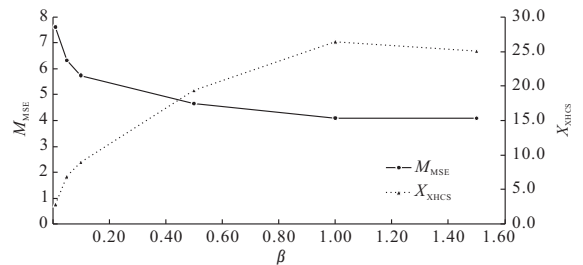


图 2 建阳流域不同岭系数评价效果

Fig. 2 Evaluation effect of different ridge coefficients in Jianyang Basin

将降雨误差微分响应岭估计方法应用于建阳流域 37 场历史洪水中, 对降雨误差进行逐步逼近估计, 并将估计所得新降雨代入新安江模型计算得到新流量过程, 结果统计见表 3。表 3 中,  $R$  为实测洪量;  $Q_{OP}$  为实测洪峰流量,  $m^3/s$ 。

为比较分析降雨误差微分响应岭估计方法在建阳流域的应用效果, 统计修正前后的评价指标

表 3 建阳流域平均微分响应修正前后计算结果

Tab.3 Calculation results of average differential response before and after correction in Jianyang Basin

洪号	修正前					修正后				
	$R_0$	$Q_{OP}$	$\Delta R$	$\Delta Q_P$	$N_{NS}$	$\Delta R$	$\Delta Q_P$	$N_{NS}$	$R_{REC}$	$X_{XHCS}$
	/mm		/%	/%		/%	/%			
42880228	114.1	2 870	6.1	-8.1	0.880	4.5	-7.1	0.948	0.567	31
42880405	37.8	1 060	-23.8	-11.8	0.661	-15.8	-2.0	0.739	0.231	13
42880520	222.4	6 760	15.5	1.4	0.909	20.0	-3.9	0.938	0.313	10
42880620	139.0	2 970	16.2	9.3	0.760	10.9	2.8	0.832	0.299	21
42890511	98.1	2 400	6.7	-13.6	0.681	12.9	-20.0	0.782	0.317	4
42890520	157.0	2 790	-11.3	-16.0	0.827	-6.6	-6.9	0.874	0.274	16
42890618	67.0	1 950	13.3	0.3	0.421	-5.3	4.8	0.653	0.401	8
42890629	155.3	3 030	0.7	-15.6	0.786	11.4	-13.0	0.889	0.480	15
42900611	83.7	2 290	33.4	31.5	0.274	-2.4	3.7	0.879	0.833	37
42900819	24.2	510	15.6	16.9	-0.118	-1.1	6.4	0.487	0.541	32
42900908	44.1	1 470	18.1	-6.3	0.860	8.4	0.1	0.903	0.304	6
42920514	86.2	3 970	-0.7	-7.1	0.909	5.2	-2.4	0.979	0.770	30
42920616	84.7	2 270	-1.5	-5.8	0.823	4.4	-5.2	0.946	0.695	17
42920704	206.1	4 600	13.5	10.5	0.878	9.1	0.1	0.906	0.228	51
42930523	110.8	1 830	-8.8	24.1	0.500	13.9	-10.0	0.782	0.565	8
42930615	310.0	7 460	8.4	-20.6	0.855	15.9	-7.2	0.947	0.633	23
42930630	114.8	2 920	-3.1	-13.4	0.837	-6.8	-8.2	0.926	0.544	11
42940425	99.1	2 310	1.4	12.6	0.730	-11.5	2.2	0.918	0.695	83
42940521	77.7	2 890	-2.5	-20.6	0.908	6.2	-12.2	0.929	0.234	4
42940614	282.8	3 890	10.2	-12.0	0.836	7.5	-5.9	0.944	0.661	30
42950424	162.9	2 110	20.4	0.4	0.397	24.2	-10.0	0.562	0.273	6
42950603	102.6	2 260	11.1	19.9	0.705	-1.2	5.9	0.928	0.754	66
42950614	87.1	2 140	22.9	12.9	0.401	9.0	7.4	0.894	0.823	45
42950619	57.5	3 110	-22.7	-20.0	0.865	-22.9	-17.9	0.864	-0.006	1
42950622	43.3	1 760	-25.4	2.9	0.215	-7.4	2.4	0.765	0.700	40
42950626	156.0	4 930	4.7	3.1	0.795	7.1	0.9	0.928	0.649	72
42960530	73.9	2 220	15.1	-11.7	0.775	8.8	2.0	0.922	0.652	25
42970605	72.1	2 110	17.3	20.7	0.714	17.3	2.9	0.869	0.543	25
42970701	284.9	5 110	6.5	-25.1	0.805	8.2	-0.2	0.968	0.836	70
42980215	85.1	1 110	-12.7	-31.3	0.712	-5.8	-9.0	0.884	0.597	19
42980301	146.2	2 650	7.7	-6.4	0.849	8.9	-5.7	0.966	0.773	21
42980509	96.5	3 470	13.8	10.7	0.833	11.6	-10.4	0.901	0.406	3
42980608	760.3	8 350	12.4	-9.3	0.858	15.6	-0.9	0.940	0.578	37
42990515	77.1	2 040	5.8	-6.9	0.882	4.1	-4.1	0.957	0.634	20
42990521	77.6	1 990	-22.6	-6.5	0.742	-4.0	0.5	0.933	0.741	29
42990715	97.8	2 230	-7.7	-13.7	0.637	-3.7	-1.4	0.946	0.850	46
42990825	116.3	1 780	3.0	7.0	0.886	6.5	2.0	0.913	0.236	3
平均	135.5	2 960	4.2	-2.6	0.710	4.2	-3.2	0.874	0.530	26.4

见表 4。进一步分析表 3、4 可知,降雨误差微分响应岭估计方法在建阳流域应用效果较好,具体表现为修正后洪峰、洪量相对误差均有效降低,平均洪量相对误差由修正前的 12.0%降低为 9.4%,平均洪峰相对误差由修正前的 12.6%降低为 5.6%,对洪量及洪峰的修正效果均较好,尤其对洪峰修正效果更为明显;流量纳什系数有一定程度提高,最高为 0.979,修正后平均流量纳什系数为 0.848,说明对流量过程有一定幅度修正;平均相对有效性系数在 0.5 以上,为 0.712,说明该方法修正效果较为明显。

表 4 建阳流域降雨误差估计修正效果比较

Tab.4 Comparison of correction effects for rainfall error estimation in Jianyang Basin

项目	平均洪量	平均洪峰	平均纳	平均相对
	相对误差/%	相对误差/%	什系数	有效性系数
修正前	12.0	12.6	0.710	
降雨误差	9.4	5.6	0.848	0.712
估计修正				

注:表 4 中平均洪量及洪峰相对误差为洪量/洪峰相对误差的绝对值取平均。

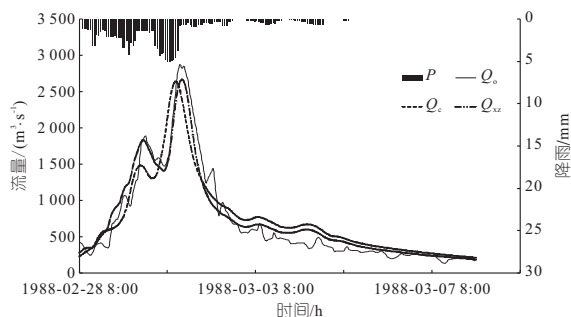


图 3 实际洪水(洪号 42880288)修正效果对比  
Fig.3 Comparison of correction effects for actual flood (flood number 42880288)

为 42880288,可以看出降雨误差微分响应岭估计方法在建阳流域修正效果较为明显,能够有效修正洪峰流量及洪水过程。进一步结合表 3 中洪号 42880288 的计算结果表明,修正后洪量误差由 6.1%降低为 4.5%,洪峰误差由 -8.1%降低为 -7.1%,流量纳什系数由 0.880 提高为 0.948。由此可见,该方法对该场洪水的洪量、洪峰修正较好,尤其对洪水过程修正最为明显。

## 4 结论

a. 将降雨误差微分响应岭估计方法应用于建阳流域洪水过程各参数预测中,对该流域 37 场历史洪水进行模拟修正,修正后平均洪量相对误差由 12%降低为 9.4%、平均洪峰相对误差由 12.6%降低为 5.6%。修正结果表明,该方法对洪峰、洪量修正效果较好,尤其对洪峰修正更为明显。修正后平均流量纳什系数由 0.710 提高为 0.848,说明该方法对流量过程修正较好;平均相对有效性系数为 0.712,高于 0.5,说明该修正方法较为有效。

b. 总体而言,该方法能够提高建阳流域洪水预报精度,修正方法有效。降雨误差微分响应岭估计方法在建阳流域洪水过程各参数预测中的应用进一步验证了方法的可行性、合理性和有效性,值得进一步研究和推广。

### 参考文献:

[1] 刘可新,包为民,赖善证,等. 动态系统响应曲线修正方法在乌溪沟流域的应用[J]. 中国农村水利水电, 2014(12):24-26.  
 [2] 杨姗姗,包为民,杨小强,等. 微分响应在降雨误差修正中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2015(1):75-79.  
 [3] 杨姗姗,曾明. 降雨误差微分响应岭估计[J/OL]. 水文. <https://doi.org/10.19797/j.cnki.1000-0852.20210447>.  
 [4] 张小琴,刘可新,包为民,等. 产流误差比例系数的系统响应修正方法[J]. 水科学进展, 2014, 25(6):789-796.

泊水动力条件与湖区水质,但改善幅度与引水口的位置和引水流量等因素有关。

b. 以总氮为分析指标,方案 3(城河入流 4 m<sup>3</sup>/s,海河出流 4 m<sup>3</sup>/s)的水动力条件与 TN 浓度的总体改善效果最好。相比于无引水条件下湖泊的整体流速提升了 44.04%;异龙湖湖东、湖中、湖西 3 个监测点的 TN 浓度分别降低了 87.76%、53.26%、47.43%,全湖总体 TN 浓度降低了 52.78%。

c. 异龙湖北部的湿地区域受风场和引水流量影响较小,水体交换率低,水动力条件较差,TN 浓度较高,因此还需综合其他辅助措施来改善湖区水动力条件进而达到改善水质的目的。

参考文献:

[1] 杜佳姚,李立雄,年正,等. 异龙湖水生植物残体资源化利用研究[J]. 环境科学导刊,2018,37(增刊1):22-25.

[2] 程伟平,张洪. 基于 EFDC 模型的滇池外海流场及温度变化研究[J]. 科技通报,2018,34(6):54-58.

[3] 齐于顺,刘仁志,张启月,等. 长江干流铜陵段突发性水污染情景模拟分析[J]. 环境工程技术学报,2022,12(2):607-614.

[4] 路洪涛,路洪波,刘金光. 基于 MIKE21 的城市湖泊人工水循环流场数值模拟[J]. 环保科技,2013,19

(2):44-48.

[5] AHN J, NA Y, PARK S W. Assessment of water quality in an artificial urban canal: A case study of Songdo City in South Korea [J]. Korean society of environmental engineers, 2019. DOI:10.4491/eer.2018.286.

[6] 曾庆慧,胡鹏,赵翠平,等. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响[J]. 生态学报,2020,40(20):7153-7164.

[7] PALIWAL R, PATRA R R. Applicability of MIKE 21 to assess temporal and spatial variation in water quality of an estuary under the impact of effluent from an industrial estate[J]. Water ence & technology, 2011, 63(9):1932-1943.

[8] 徐丹,付湘,谢亨旺,等. 间歇式引水冲污对城市湖泊水质改善的研究[J]. 中国农村水利水电,2019(3):24-27.

[9] 赵正文. 城市人工湖水动力特性与水质变化规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.

[10] 刘薇. 异龙湖水质时空变化研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.

[11] 郭宇嘉,王颖,孙佳乐,等. 不同进口启闭情况对流场及浓度场的影响研究[C] //中国水利学会 2018 学术年会论文集第二分册,2018:189-197.

[12] 张锐,谢海涛,段学新,等. 异龙湖及主要入湖河流(含湿地)水质监测与评价[J]. 环境科学导刊,2022,41(1):85-86.

### Study on Hydrodynamic Optimization and Water Quality Improvement of Yilong Lake Based on MIKE21

MA Tie-mei, FU Jun-feng, SUN Ying

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** Lakes are highly susceptible to eutrophication due to their long-term closed or semi-closed status and poor hydrodynamic conditions. This paper constructed a hydrodynamic-convective diffusion model with MIKE21 software by considering the influence of rainfall on the spatial and temporal distribution of TN concentration in the Yilong Lake. The model simulated the hydrodynamic conditions under different inlet opening and closing conditions and different flow diversion schemes. The improvement of TN concentration based on the flow velocity distribution of the lake flow field was discussed. The results show that the hydrodynamic conditions and the water quality of the lake can be effectively improved by setting up water diversion inlets and increasing water diversion flow. The overall effect of diverting water from the Chenghe alone is better than diverting water from the Chenghe and Longgang River together. Under the scheme of separate diversion from the Chenghe, when the water diversion flow was double, the overall flow rate of the lake was increased by 44.04% and the TN concentration decreased by 52.78%, with the best effect of hydrodynamic optimization and water quality improvement, but the efficiency of water quality improvement per unit of water recharge is reduced. This research could provide some references for similar projects.

**Key words:** water body renewal; MIKE 21 software; convective diffusion; water quality improvement; Yilong Lake

\*\*\*\*\*  
(上接第 3 页)

### Application of Ridge Estimation Method of Rainfall Error Based Differential Response in Flood Forecasting of Jianyang Basin

YANG Shan-shan<sup>1</sup>, CHENG Rui<sup>2</sup>, YAN Wen-zhu<sup>1</sup>, ZHANG Qian<sup>3</sup>

(1. Chinese Hydraulic Engineering Society, Beijing 100053, China; 2. China South-to-North Water Diversion Corporation Limited, Beijing 100036, China; 3. China Water Resource Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China)

**Abstract:** To improve the accuracy of areal mean rainfall data and solve the problems of instability of least square estimation in runoff error correction based on dynamic system response curve, ridge estimation of rainfall error based on differential response was introduced based on least square ridge estimation. The calculation of the Xin'anjiang model was generalized a system. The method was applied in flood forecast error correction in Jianyang basin with 37 historical floods chosen as test samples. The results indicate that the ridge estimation of rainfall error based on differential response has obvious correction effects in Jianyang basin, which can improve the accuracy and stability of flood forecasting.

**Key words:** error correction; rainfall error; ridge estimation; Xin'anjiang model