

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221713

推理公式法在复杂丘陵地貌设计洪水计算中的适用性分析

刘春果¹, 喻海军^{1, 2}, 吴滨滨^{1, 2}, 马建明³, 杨 滨¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

摘要: 为研究推理公式法在复杂丘陵地区设计洪水计算中的适用性和误差来源, 采用 Morris 筛选法分析了推理公式法参数的敏感性, 通过与水文比拟法、历史洪水调查等结果进行对比, 分析了推理公式法在不同流域面积的适用性。结果表明, 面平均雨量是推理公式法主要的误差来源, 误差随流域面积增大呈增加趋势, 通过合理选择参数, 对于面积在 500~1 000 km² 的流域, 推理公式法仍具有适用性; 以蒲江河流域为例, 采用传统面雨量计算方法(不折减), 当控制断面集雨面积分别为 100 km² 左右、100~500 km²、大于 500 km² 时, 误差分别为 5.1%~5.3%、11.2%~16.0%、25.2%~25.5%, 当流域面积大于 500 km² 时, 通过面雨量合理折减后, 计算结果比历史调查资料仅小约 0.2%。

关键词: 推理公式法; 设计洪水; 丘陵地貌; 敏感性分析

中图分类号: TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0057-04

1 概况

蒲江河位于四川省西南部, 为南河一级支流、岷江二级支流, 流域面积约 836 km²。蒲江河流域位于川西北高原与四川盆地地形分界线附近, 地形地貌复杂, 以丘陵为主, 山地、丘陵、平坝俱全^[1]。流域水系及地形地貌分布见图 1。蒲江河流域上下游暴雨强度随空间变化差异较为明显。根据 2010 年出版的四川省暴雨等值线图, 蒲江河流域上游位于青衣江暴雨区边缘, 暴雨强度随空间变化相对较大, 中下游丘陵区及平坝区降雨强

度随空间变化相对较小。蒲江河流域复杂的下垫面、产汇流条件及降雨特性使参数选取及设计洪水计算较为困难, 研究蒲江河流域设计洪水计算十分有必要。但蒲江河缺乏长序列水文资料, 对于这类无资料地区设计洪水的计算, 推理公式法是最常用的方法之一。理论上在基于流域下垫面、降雨时空变化特性的情况下合理选择参数, 推理公式法适用于流域面积最大为 1 000 km² 的丘陵地貌流域^[2]。实际应用过程中, 由于推理公式法的假定简化了产汇流等过程, 推理公式法在实际复杂的流域中适用性及计算精度受到限制^[3,4]。为研究推理公式法的误差来源及适用流域面积, 本文以地形地貌复杂的蒲江河流域为例, 研究了推理公式法在复杂地貌流域的误差来源及在不同集雨面积条件下的适用性。

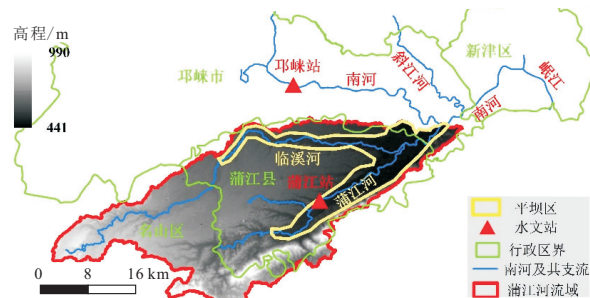


图 1 南河流域水系及蒲江河流域地形图

Fig. 1 River system of Nanhe River Basin and topographic map of Pujiang River Basin

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

蒲江河无长序列实测水文资料(蒲江站设立于 2019 年, 2020 年投入使用), 查阅四川省洪水调查、长滩水库规划设计等报告, 收集蒲江河流域

收稿日期: 2022-08-17, 修回日期: 2022-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909272)

作者简介: 刘春果(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为防洪减灾, E-mail: lcguowhuedu@163.com

通讯作者: 喻海军(1988-), 男, 博士、高级工程师, 研究方向为城市洪涝与计算水力学, E-mail: leiwi@gmx.com

历史洪水调查资料,见表 1。

表 1 历史洪水调查结果

Tab. 1 Results of historical flood survey

河段	集雨面积/km ²	调查期	年份	洪峰流量/(m ³ ·s ⁻¹)	估算重 现期/a
长滩水库	123	1861~	1871	1 020	110
			1977	800	55
		1948	1944	680	28
			1954	350	12
			2010	1 492	33
蒲江县鹤山镇取虹村	284	1917~	1947	1 890	100
			2020	957	10
		1981	1 500	33	
			2010	1 492	33
河口	836	1917~	2010	2 650	20
			2020	2 300	18
		2020-08-11	2 990	25	
			2020-08-30	2 680	20

蒲江河干流上从上游往下游依次选取 4 个代表性控制断面,各断面对应流域参数(集雨面积 F 、河长 L 、平均坡降 J)等信息见表 2。

表 2 蒲江河控制断面流域参数信息

Tab. 2 Watershed parameter information of Pujiang

River control sections

控制断面	F/km^2	L/km	$J/\%$	位置	地形地貌
PJ1	123.0	27.0	8.139	长滩水库	上游山丘区
PJ2	284.0	41.0	5.347	鹤山镇	丘陵与平坝交界处
PJ3	445.5	61.6	3.415	临溪河汇入前	下游平坝区
PJ4	836.0	71.5	1.743	河口	下游平坝区

2.2 研究方法

为分析推理公式法在复杂丘陵地貌设计洪水计算中的适用性,将推理公式法应用于蒲江河流域,并采用水文比拟法进行比较。

2.2.1 推理公式法

推理公式法是丘陵地区最常用的设计洪水计算方法,一般形式^[3]为:

$$Q_{m,p} = 0.278\psi FS_p/\tau^n \quad (1)$$

式中, $Q_{m,p}$ 为频率为 p 、单位时间的产流量; 0.278 为单位换算系数,即 1/3.6; ψ 为径流系数; F 为集雨面积; S_p 为频率为 p 、 $\tau=1$ h 的平均雨强,也称雨力; τ 为汇流时间; n 为暴雨指数, $0 < n < 1$ 。

2.2.2 水文比拟法

应用水文比拟法时,选取与蒲江河流域下垫面条件、气候条件、产汇流条件相似的流域的水文站作为参证站,通过下式计算设计洪水:

$$\frac{Q_{\text{设计}}}{Q_{\text{参证}}} = \left(\frac{F_{\text{设计}}}{F_{\text{参证}}} \right)^{n'} \quad (2)$$

式中, $Q_{\text{设计}}$ 、 $Q_{\text{参证}}$ 分别为设计站、参证站的洪峰流量; $F_{\text{设计}}$ 、 $F_{\text{参证}}$ 分别为设计站、参证站的集雨面积; n' 为经验性指数。

选择具有历史水文资料的伏龙站及邛崃站作为参证站。伏龙站位于长秋山东侧思濛河流域中

游,控制集雨面积 271 km²,上游地貌以丘陵为主,中下游系岷江、青衣江、大渡河冲积而成的冲积平原;且伏龙站与蒲江河流域距离约 20 km,处于青衣江暴雨区下游,下垫面条件、植被及暴雨特性与蒲江河流域有一定的相似性^[1]。邛崃站位于南河干流上游,控制集雨面积 1 435 km²,与蒲江河均属于南河流域,下垫面、地形地貌、植被等具有一定的相似性。

2.3 敏感性分析方法

推理公式法参数较多,为研究推理公式误差来源,采用 Morris 筛选法分析推理公式法各参数敏感性。Morris 筛选法是一种定性的全局敏感性分析方法,能简单高效地筛选敏感性高的参数^[5],具体方法是在其他参数不变的情况下,以固定步长将待分析参数浮动取值,分析对目标值的扰动,并用参数敏感因子指标 S 来表征参数的敏感性,计算公式为:

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{Y_0} \right) \left/ \left(\frac{P_{i+1} - P_i}{100} \right) \right. \quad (3)$$

式中, S 为参数敏感因子指标; Y_i 、 P_i 分别为第 i 次目标值计算结果及参数与初始值的调整比率; Y_{i+1} 、 P_{i+1} 分别为第 $i+1$ 次目标值计算结果及参数与初始值的调整比率; N 为模拟运行次数。

当 $|S| \geq 1$ 时,表明参数高度敏感;当 $0.2 \leq |S| < 1$ 时,表明参数敏感;当 $0.05 \leq |S| < 0.2$ 时,表明参数中等敏感;当 $|S| < 0.05$ 时,表明参数不敏感。

3 结果与讨论

3.1 推理公式法敏感性分析结果

推理公式法主要参数有三种,即流域参数 (F 、 L 、 J)、暴雨参数(设计点暴雨 H 、 S_p 、 n 、点面折减系数)及产流参数 μ 、汇流参数 m 。产、汇流参数理论公式复杂,难以直接运用,实际运用中一般根据地区下垫面资料,利用图解法直接建立产、汇流参数与流域参数的关系^[3]。因此,本次仅选取流域参数及暴雨参数两类参数,采用 Morris 筛选法分析其对推理公式设计洪峰计算结果的敏感性。其中,点面折减系数扰动与设计点暴雨扰动对设计洪水计算结果影响一致,因此两者敏感因子相同。

以控制断面 PJ2、PJ4 为例,将待分析参数以 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 步长扰动,以不同频率设计洪峰为目标值,各参数敏感因子指标绝对值结果见表 3。

表 3 推理公式法参数敏感性因子绝对值

Tab. 3 The absolute value of parameter sensitivity factor of reasoning formula method

洪水 频率	F		L		J		H		S _p		n	
	PJ2	PJ4	PJ2	PJ4	PJ2	PJ4	PJ2	PJ4	PJ2	PJ4	PJ2	PJ4
P=1%	1.09	1.09	0.28	0.28	0.09	0.09	2.89	2.87	1.29	1.28	1.58	1.71
P=2%	1.09	1.09	0.29	0.29	0.10	0.10	2.94	2.92	1.31	1.30	1.66	1.80
P=5%	1.11	1.10	0.32	0.32	0.11	0.10	3.07	3.03	1.37	1.35	1.89	2.03
P=10%	1.12	1.12	0.35	0.34	0.11	0.11	3.21	3.17	1.43	1.41	2.10	2.26

由表 3 可知,参数敏感性因子绝对值由大到小依次为设计点暴雨 H=点面折减系数>暴雨指数 n>雨力 S_p>流域面积 F>河长 L>河道比降 J。推理公式法计算结果对设计点暴雨 H、点面折减系数、暴雨指数 n、雨力 S_p、流域面积 F 高度敏感;对河长 L 敏感;对比降 J 中等敏感。暴雨参数的敏感因子远大于流域参数,且随流域面积的增大,暴雨指数 n 敏感因子变大。

蒲江河流域参数通过 DEM 划分小流域获得,流域重心设计点暴雨 H 通过查四川省暴雨等值线图获得,具有较高的精度。推理公式法计算过程中,在四川省暴雨等值线图上查得的流域重心设计点暴雨 H,经由点面折减系数折减后,再利用暴雨公式转化为所需历时面平均雨量。根据敏感因子结果,由点面折减系数、雨力、暴雨指数等参数共同确定的面平均雨量是否代表整个流域的面平均雨量,是推理公式法主要的误差来源。

3.2 蒲江河设计洪水计算结果及分析

3.2.1 设计洪水计算结果与分析

蒲江河流域位于两个暴雨时面深关系区图 I₁ 区、I₂ 区交界处,下垫面及降雨兼具两区特性: I₁ 区主要包括成都中心城区、金堂、简阳等岷江、沱江冲积平原部分,区域内暴雨强度变化相对较小; I₂ 区主要包括鹿头山暴雨区、青衣江暴雨区等山地丘陵地区,区域内暴雨强度变化大,随着流域面积增大,点面折减系数急速减小。

结合敏感性分析及蒲江河流域地形地貌、降雨特性分析,本次推理公式法计算 3 种方案,即设计点暴雨不折减(四川省水文手册推荐的传统方法)及分别采用 I₁ 区、I₂ 区点面折减系数折减;并与水文比拟法的 2 种方案(以伏龙站、邛崃站为参证站)进行比较。将计算结果用双对数坐标系绘制,见图 2。

由图 2 可知,推理公式法 3 种面平均雨量计算方法结果差异明显,设计点暴雨不折减计算结果最大,按照 I₁ 区折减时计算结果居中,按照 I₂ 区折减计算结果最小,水文比拟法计算结果基本处于不折减及按照 I₁ 区折减计算结果之间。具体表现为当集雨面积约 100 km² 时,设计点暴雨

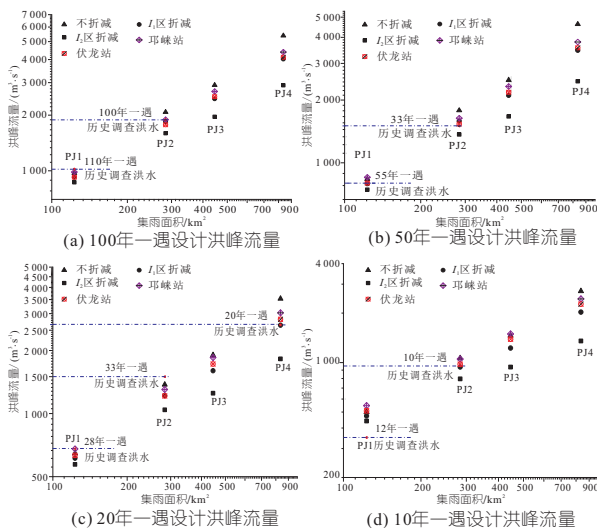


图 2 设计洪峰流量计算结果

Fig. 2 Calculation results of design peak flow

不折减时,按照 I₁ 区、按照 I₂ 区折减时计算结果分别比历史调查资料小 4%~5%、1%~9%、7%~15%。当集雨面积在 100~500 km² 之间时,设计点暴雨不折减时、按照 I₁ 区、按照 I₂ 区折减时计算结果分别比历史调查资料大 10%、小约 2%、小约 16%。当集雨面积大于 500 km² 时,设计点暴雨不折减时、按照 I₁ 区、按照 I₂ 区折减时计算结果分别比历史调查资料大 33%、小约 0.2%、小约 31%。综合分析历史调查洪水资料与几种方法计算结果,总体上设计点暴雨按照 I₁ 区折减后计算结果较为合理。其原因在于蒲江河流域虽发源于青衣江暴雨区边缘,但流域内大部分区域位于青衣江下游丘陵、平坝区,降雨变化相对较小,与 I₁ 区降雨变化特性更为接近。

设计点暴雨按照 I₁ 区折减时计算结果与以伏龙站为参证站时计算结果较为接近(相差 0.2%~13.3%),比以邛崃站为参证站计算结果小约 6.8%~21.9%。伏龙站上游地形地貌与蒲江河流域地形地貌相似,而邛崃站上游以山地、丘陵为主,蒲江河流域上游山地、丘陵地区汇流快,下游平坝区汇流慢,山地、丘陵的汇流经过平坝地区的调蓄、削减,比以山地、丘陵地貌为主的邛崃站比拟得来的洪峰流量小,这是合理的。

3.2.2 设计洪水一致性分析

流域地形地貌和暴雨特性相似的情况下,同一流域设计洪水成果理论上应具有有一致性。选取蒲江河所在南河流域的南河干流和斜江河,分别比较分析 3 个控制断面(蒲江河汇入后南河、斜江河汇入后南河、南河河口)设计洪水计算结果与蒲江河推理公式法结果(按 I₁ 区折减)。3 个断面集雨面积 1 880~3 640 km²,设计洪水成果采用

排频法、洪峰模数法等方式计算,成果经过论证分析,较为可靠^[1]。以集雨面积为横坐标,以平坝区控制断面(PJ2-PJ4)计算结果(按 I_1 区折减)及南河流域其余 3 个断面设计洪水为纵坐标,并与设计点暴雨不折减时洪水结果对比,在双对数坐标系上绘制,结果见图 3。由图 3 可知,蒲江河不同流域面积的设计洪水结果(按 I_1 区折减)与南河流域其他 3 个控制断面结果较为均匀地分散在拟合直线两侧,不折减时计算结果位于拟合直线上侧,可见推理公式法选取 I_1 区点面折减系数结果与南河流域其他控制断面设计洪水具有一致性,间接表明采用 I_1 区点面折减系数计算的设计洪水结果是合理的。

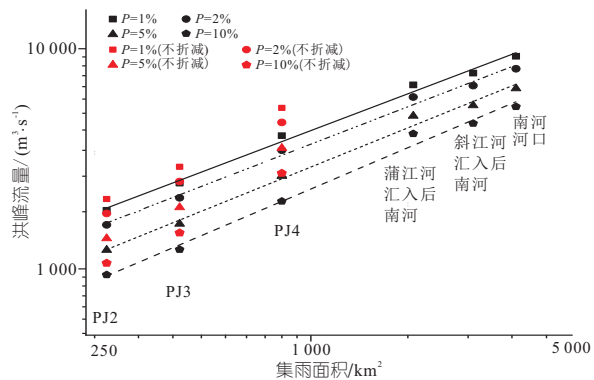


图 3 设计洪水与集雨面积关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between design flood and watershed area

3.2.3 适用性及误差分析

综上对比分析,推荐使用设计点暴雨按照 I_1 区折减时的结果作为设计洪水推荐值。与设计洪水推荐值相比,设计点暴雨不折减和按照 I_2 区折减这两种洪水结果,当集雨面积为 100 km^2 左右时,分别比推荐值大 $5.1\% \sim 5.3\%$ 和小 $6.1\% \sim 6.9\%$;当集雨面积在 $100 \sim 500 \text{ km}^2$ 之间时,分别比推荐值大 $11.2\% \sim 16.0\%$ 和小 $13.4\% \sim$

23.4% ;当集雨面积大于 500 km^2 时,分别比推荐值大 $25.2\% \sim 25.5\%$ 和小 $27.9\% \sim 33.3\%$ 。表明随集雨面积增大,面平均雨量不同计算方法结果相差增大,尤其是集雨面积大于 500 km^2 时,流域内下垫面、降雨变化对面平均雨量影响不可忽略,但通过在分析推理公式法误差来源及研究区域地形地貌的基础上选择参数(尤其是影响面雨量的参数),推理公式法仍能取得较为精确的结果。

4 结论

a. 由点面折减系数、雨力、暴雨指数等参数共同确定的面平均雨量是推理公式法主要的误差来源。

b. 误差随流域面积增大呈增加趋势,通过合理选择参数,对于面积在 $500 \sim 1000 \text{ km}^2$ 的流域,推理公式法仍具有适用性,当流域面积大于 500 km^2 时,通过面雨量合理折减后,蒲江河流域设计洪水计算结果比历史调查资料仅小约 0.2% 。

参考文献:

- [1] 四川中进项目管理有限公司,邛崃市水务局.邛崃市防洪规划(2017-2035)[R].四川:成都市水利电力勘测设计院,2019.
- [2] 四川省水利电力厅.四川省中小流域暴雨计算手册[M/OL]/https://www.wdfxw.net/doc59062159.htm,1984.
- [3] 王杰,王俊.新疆冲洪积扇小流域设计洪水计算方法研究——以罗布泊钾盐矿外部供水工程沿线小流域洪水计算为例[J].水资源与水工程学报,2014,25(4):221-224.
- [4] 姜钧耀,张静怡,刘祖辉,等.西北内陆河流区间洪水设计计算方法比较分析[J].水电能源科学,2014,32(4):73-75.
- [5] 向代锋,程磊,徐宗学,等.基于局部和全局方法的SWMM敏感参数识别[J].水力发电学报,2020,39(11):71-79.

Applicability Analysis of Reasoning Formula Method in Design Flood Calculation of Complex Hilly Landform

LIU Chun-guo¹, YU Hai-jun^{1,2}, WU Bin-bin^{1,2}, MA Jian-ming³, YANG Bin¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. National Institute of Natural Hazards, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to study the applicability and error sources of reasoning formula method in design flood calculation in complex hilly areas, Morris screening method was used to analyze the sensitivity of reasoning formula method parameters. The applicability of reasoning formula method in different watershed areas was analyzed by comparing with hydrological comparison method and historical flood survey results. The results show that the area average rainfall is the main error source of the reasoning formula method, and the error tends to increase with the area of the basin. The reasoning formula method can still be applied to the basin with an area of $500 \sim 1000 \text{ km}^2$ by reasonable selection of parameters. Taking Pujiang River Basin as an example, using the traditional area rainfall calculation method (without reduction), when the control section catchment area is about 100 km^2 , $100 \sim 500 \text{ km}^2$ and more than 500 km^2 , the error is $5.1\% \sim 5.3\%$, $11.2\% \sim 16.0\%$ and $25.2\% \sim 25.5\%$, respectively. When the basin area is larger than 500 km^2 , the calculated result is only about 0.2% smaller than the historical survey data after reasonable reduction of area rainfall.

Key words: reasoning formula method; flood design; hilly landform; sensitivity analysis