

引用格式:翟晓燕,刘荣华,杨益长,等.面向山洪预警的水雨情监测站网布设方法研究[J].地球信息科学学报,2017,19(12):1634-1642. [Zhai X Y, Liu R H, Yang Y C, et al. 2017. Flash flood warning-oriented hydrometric network optimal design . Journal of Geo-information Science, 19(12):1634-1642.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2017.01634

面向山洪预警的水雨情监测站网布设方法研究

翟晓燕^{1,2}, 刘荣华^{1,2}, 杨益长³, 毕青云⁴, 刘 启^{1,2}

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. 顺昌县水利局, 南平 353200; 4. 福建省防汛抗旱指挥部办公室, 福州 350001

Flash Flood Warning-oriented Hydrometric Network Optimal Design

ZHAI Xiaoyan^{1,2*}, LIU Ronghua^{1,2}, YANG Yichang³, BI Qingyun⁴ and LIU Qi^{1,2}

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. Bureau of Water Conservancy in Shunchang, Nanping 353200, China; 4. Office of Fujian Provincial Flood Control and Drought Relief Headquarters, Fuzhou 350001, China

Abstract: Flash flood disaster ranks top among the natural hazards in China due to its frequent occurrence and high mortality. It has posed a severe threat to national public safety and water security. The optimal design of hydrometric network helps to capture the spatial and temporal variability of regional storm events and flash flood regimes, which can significantly improve the accuracy of flash flood warning and strengthen the flood defense capacity in small and medium catchments. However, the quantitative research on the optimal design of hydrometric network is relatively rare with consideration of flash flood disaster prevention and control. In this study, a flash flood warning-oriented method for the optimal design of hydrometric network is proposed, and Shunchang County in Fujian Province which is frequently subject to flash flood disasters is selected as a case study. Specifically, the optimal design method for rainfall station includes the Cone method and the correlation analysis method, and should further consider the characteristics of historical storm events and flash flood disasters, and local social and economic situations. The optimal design of water stage station should comprehensively consider the occurrence frequency and impact extent of historical flash flood disasters, flash flood warning requirements, and local social and economic situations. The current densities are 37 km² per station and 76 km² per station for rainfall stations and water stage stations, respectively, while most of the stations are distributed along the main streams in the plain, and the monitoring stations are insufficient especially in the key prevention districts for flash flood disasters. Thus, the current monitoring capacity and early warning capacity are rather weak in Shunchang County, which significantly weakens the warning and forecasting capacities of local flash flood disasters. For addressing those above-mentioned problems, the current designs of rainfall station and water stage station are quantitatively analyzed and optimized according to the spatial and temporal characteristics of storm events, the historical flash flood disasters and the forecasting requirements of flash floods. The results show that three new rainfall stations and three new water stage stations are suggested to be established in Shunchang County, in which one water stage station monitors rainfall process meanwhile. The three new rainfall stations are evenly distributed along the densely populated mountainous tributaries with rare

收稿日期 2017-07-14; 修回日期: 2017-08-24.

基金项目 国家自然科学基金青年基金项目(51409143); 中国水科院科研专项(JZ0145B042016)。

作者简介 翟晓燕(1989-), 女, 工程师, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: zhaixy@iwhr.com

rainfall monitoring stations and relatively weak flood defense capacity. Their establishments can improve the forecasting accuracy of local flash floods. The three new water stage stations are evenly distributed along the densely populated mountainous tributaries with relatively weak flood defense capacity, and their establishments can guarantee the forecasting requirements of flash flood disasters, and the safety of downstream villages and water infrastructures. After the optimal design of the hydrometric network in Shunchang County, the density of rainfall station and water stage station arrive at 34 km^2 per station (31 rainfall stations) and 68 km^2 per station (29 water stage stations), respectively. This study is expected to provide scientific references and technical guidance for the robust and quantitative design of hydrometric network in regions frequently hit by flash floods.

Key words: hydrometric network; network optimal design; Cone method; flash flood warning; Shunchang County

***Corresponding author:** ZHAI Xiaoyan, E-mail: zhaixy@iwhr.com

摘要: 山洪灾害是中国高频发、高死亡率的自然灾害之一。水雨情站网的合理布设及优化,有利于捕获区域暴雨、洪水情势变化的时空异质性,可显著提高中小流域山洪预警的精度,增强山洪灾害防御能力。本文以山洪灾害高发的福建省顺昌县为例,提出了面向山洪预警的水雨情站网布设方法。县内现状雨量和水位站网监测密度分别为 $37 \text{ km}^2/\text{站}$ 和 $76 \text{ km}^2/\text{站}$,主要分布在平原主干河流地区,山洪灾害重点防治区内站网布设不足,小流域暴雨山洪监测和预警能力较弱。针对上述问题,综合分析流域降雨时空特征、历史山洪灾害与山洪灾害预警预报需求,对研究区水雨情站网进行了合理性分析和布设研究,建议增设雨量站3座、水位站3座,其中一座水位站同时监测降雨过程,调整后县内雨量站和水位站的监测密度达到 $34 \text{ km}^2/\text{站}$ 和 $68 \text{ km}^2/\text{站}$ 。本文研究对山洪灾害高发区的水雨情站网布设具有参考和指导意义。

关键词: 水雨情站网;站网布设;锥体法;山洪预警;顺昌县

1 引言

山洪灾害已成为中国高频发和高死亡率的自然灾害之一,严重威胁了国民生命财产安全和水安全,是中国防汛减灾工作的重点和难点问题^[1-3]。短历时强降雨是诱发山洪灾害的直接因素和激发条件^[4],溪沟、河川水情变化是山洪过程的直观反映,及时准确地监测降雨和径流情势变化是预测山洪暴发的基础和前提^[5-6]。地面监测站网是获取区域尤其是地形复杂的中小流域暴雨、水文特性的重要途径之一,水雨情站网的合理布设及优化有利于捕获降雨量及强度变化、洪水情势变化的时空异质性^[7],减少流域水文模拟的不确定性,显著提高中小流域洪水预报、山洪灾害预警的精度^[8]。中国自1956年开展了第一次全国站网规划,并逐年进行了优化调整。截止到2009年,中国雨量站和水位站平均密度约为 $500 \text{ km}^2/\text{站}$ 和 $5600 \text{ km}^2/\text{站}$,基本达到世界气象组织推荐的容许最稀站网密度^[9],但对于山洪灾害频繁发生的山丘区中小流域的站网密度要求仍难以满足,严重制约了山洪灾害预警预报能力^[10]。2006年国务院正式批复了《全国山洪灾害防治规划》,要求加强水雨情监测等非工程措施建设,提升山洪灾害监测预警和防御能力。自2010年起,中国已初步建立了覆盖山洪灾害防治区的监测预警网

络^[6,11],但仍需结合区域山洪特点和规律、山洪灾害预警需求等,进一步完善优化水雨情监测站网,提升县级、省级和国家级防灾减灾能力,为山丘区人民生命财产提供安全保障。

近年来,国内外许多学者对水雨情站网布设方法开展了广泛的研究^[12-13]。国外常用的方法包括统计分析法、空间插值技术、熵理论、用户调查法以及综合法等^[14]。统计分析法包括方差缩减技术^[15-16]、主成分分析法^[17-18]、回归分析法^[19-20]、广义最小二乘法^[21]等,常用于水文气象条件均质的流域;空间插值技术依赖已建测站的长序列历史资料进行站网优化或布设^[22-23];熵理论认为雨量站应布设在信息传递值较小的地区^[24-26]。上述方法多用于已设站网稠密地区的优化问题。中国学者于20世纪50、60年代提出了积差法、暴雨中心控制面积法、锥体法等基本雨量站网布设方法^[13,27],但前2种方法由于存在理论缺陷和布站间距要求较小等问题,已较少应用^[28];锥体法由于方法简便、资料要求低,目前已被广泛用于中国站网稀疏的中小流域站网布设及规划^[29-31]。20世纪80年代以来提出的抽站法和流域水文模型法等对站网密度和监测序列长度要求较高,常用于检验其他方法的合理性^[5,32-34]。1981年原水利电力部水文局采用江西省雨量站网试验区高密度的雨量站点构建了经验公式,用于梅雨型中小

河流配套雨量站网布设^[35-37]。王美荣等^[38]基于流域数字水文模型探究了水阳江流域29个雨量站布设的合理性。李春红等^[39]采用相关分析、雨量等值线、抽站法、站网与预报模型匹配法论证了新丰江流域的雨量站网布设。虽然近年来水雨情站网布设方法已较为成熟并得到了广泛的应用,但考虑山洪灾害防治的站网布设定量化方法研究相对较少^[5,40-41]。因此,本文以山洪灾害高发的福建省顺昌县为例,提出了面向山洪预警的水雨情站网布设方法,综合分析流域降雨时空特征、历史山洪灾害与山洪灾害预警预报需求,对水雨情站网进行了合理性分析,并给出优化布设方案。

2 研究区概况

顺昌县位于福建省西北部(117°30′~118°14′ E, 26°39′~27°12′ N),全县总面积为1985 km²,其中山区面积为1618 km²,占总面积的81.5%。县域属亚热带湿润性季风气候,多年平均降雨量和径流深分别为1756 mm和870 mm,其中汛期(4~10月)降雨量约占全年总量的78%。县内洪水主要由锋面雨和台风雨形成。富屯溪和金溪为县内主干流,属于闽江水系,境内山区性小溪流众多,短历时、强暴雨极易导致洪水峰高流急,极易暴发山洪灾害。顺昌县已建雨量站28座、水位站26座,其中水库水位站14座,水位站同时监测降雨过程。已建雨量站网监测密度约为37 km²/站,水位站网监测密度约为76 km²/站。流域内下垫面空间分布较为均匀,主要的土地利用类型为有林地(79%)和耕地(13%),主要的土壤类型为红壤(80%)和水稻土(16%)。顺昌县地形及水雨情监测站网布设情况如图1所示。

顺昌县是福建省山洪灾害的频发地区,全县共有12个乡、132个村位于山洪灾害危险区,约38%的人口受到山洪灾害威胁。据历史山洪灾害数据显示:截至2010年,顺昌县共发生了31次大型山洪灾害,其中2010年6月顺昌县各流域山洪全面暴发,多条溪沟发生有记录以来最大洪水,因灾死亡、失踪14人,直接经济损失约10亿元人民币。

3 研究方法

3.1 雨量站网布设方法

雨量站网布设涉及雨量站总数及其空间分布

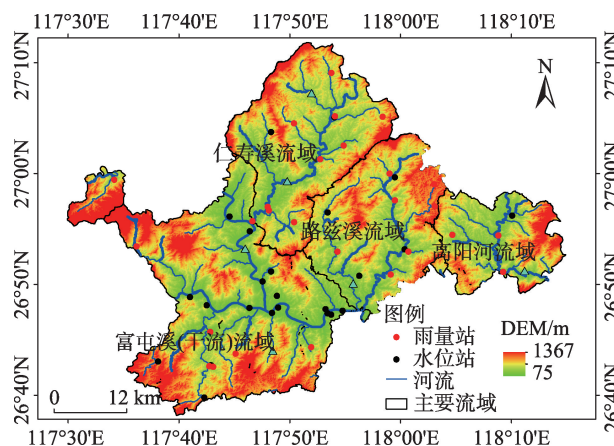


图1 研究区概况图

Fig. 1 Map of the study area

分析和优化。采用锥体法分析满足流域山洪灾害预警分析要求的雨量站总数;采用相关系数法和考虑山洪预警的站网布设方法对雨量站的空间分布进行优化,前者侧重降雨过程的时空分布特征,后者侧重历史山洪灾害情况及山洪灾害预警预报需求。

3.1.1 锥体法

锥体法认为场次暴雨量从暴雨中心向边缘逐渐减少,以暴雨等值线梯度变化最大的一边作为圆锥体的一边,以通过暴雨中心的垂线为轴线^[27]。假设从暴雨中心至边缘的降雨量呈直线变化,可将降雨总量概化为圆锥体和圆柱体的组合,降雨总量计算如下:

$$w = \frac{1}{3}\pi L_n^2(p_0 - p_n) + \pi L_n^2 p_n = \frac{1}{3}\pi L_n^2(p_0 + 2p_n) \quad (1)$$

式中: p_0 为暴雨中心雨量; p_n 为计算面积边缘雨量; L_n 为计算面雨量的面积半径。

若雨量站网按正方形网格点布设,暴雨中心处于4个雨量站所形成的网格中心,即正方形对角线交点,依据三角函数可得漏测暴雨中心的水量为:

$$v = \frac{1}{3}\pi\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\Delta l\right)^2(p_0 - p_i) = \frac{1}{6}\pi\Delta l^2(p_0 - p_i) \quad (2)$$

式中: Δl 为雨量站间距; p_i 为暴雨中心附近网格点雨量站雨量。

降雨总量相对误差为:

$$\rho = \frac{v}{w} = \frac{\Delta l^2(p_0 - p_i)}{2L_n^2(p_0 + 2p_n)} \quad (3)$$

如果推求面雨量允许的相对误差为 e ,则:

$$\Delta l = \sqrt{\frac{2eL_n^2(p_0 + 2p_n)}{(p_0 - p_i)}} \quad (4)$$

流域内应设雨量站数量为:

$$N = \frac{A}{\Delta I^2} \quad (5)$$

式中: A 为流域面积; N 为布设雨量站个数。

3.1.2 相关系数法

降雨量与其所处的地理位置、地形、地貌等条件密切相关,相邻站点降雨量存在相关性,当邻近雨量站的降雨特性较为相近,表现为其降雨量相关系数较大,可考虑进行站点合并,当邻近站的降雨量相关系数较小,需在相邻雨量站间增设雨量站。相邻雨量站的降雨量相关系数计算如下:

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m [(X_{ik} - \bar{X}_i)(X_{jk} - \bar{X}_j)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (X_{ik} - \bar{X}_i)^2 \sum_{k=1}^m (X_{jk} - \bar{X}_j)^2}} \quad (6)$$

式中: i 和 j 分别表示第 i 和第 j 个雨量站 ($i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, n$; $i \neq j$); n 为流域内雨量站个数; R_{ij} 为第 i 和第 j 个雨量站的降雨量相关系数; X_{ik} 和 X_{jk} 分别为第 i 和第 j 个雨量站的第 k 个降雨量值 ($k=1, 2, \dots, m$); m 为降雨量序列长; \bar{X}_i 和 \bar{X}_j 分别为第 i 和第 j 个雨量站的降雨量平均值。

3.1.3 考虑山洪预警的站网布设

为满足山洪灾害预警预报的需求,需进一步结合县内历史山洪灾害情况、人口分布、社会经济状况等实际情况,对雨量站网分布进行布设研究。站网布设原则如下^[42-44]:

(1)雨量站布设需满足分区控制、流域控制、地形控制等原则;

(2)雨量站应分布均匀,以便掌控区域降雨时空变化规律,满足面雨量计算和有关水情业务系统的需求;

(3)山洪易发区内的主暴雨区及地质灾害多发区的雨量站网布设密度应达到 20~30 km²/站,次暴雨区及地质灾害区雨量站网布设密度应达到 50~100 km²/站,一般暴雨区雨量站网布设密度应达到 100~200 km²/站;

(4)山洪灾害重点防治区范围内人口分布较为稠密或分布有重要工况的村庄、流域,应加密雨量站网布设,保障山洪灾害预警预报的需要,减少山洪暴发造成的社会经济损失;

(5)站网布设应充分考虑通信、交通等运行管理维护条件。

3.2 水位站网布设方法

水位预警直观可靠,且适用于水库、堤防等水

利工程以及雪山融水、地下河等特殊条件。水位站的合理布设对溪沟洪水预警至关重要。水位站的布设应考虑山洪灾害发生的频度、影响程度、影响范围、人口社会经济等实际情况因地制宜确定。站网布设原则如下^[42-44]:

(1)山洪灾害重点防治区范围内人口分布较为稠密或分布有重要工况的村庄、流域,应在其上游布设水位监测站,并预留至少 30 min 的洪水预警时间;

(2)对于无水位监测设施的水库(尤其是重要的小 I 型水库)、山塘等水利设施,其下游人口分布较为密集时,应在坝前布设水位监测站,并预留至少 30 min 的洪水预警时间;

(3)水位站网布设应符合容许最稀站网原则和《水文站网规划技术导则》(SL34-92),并考虑通信、交通等运行管理维护条件;

(4)水位站网布设应满足山洪灾害预警预报需求,以进一步提高小流域暴雨洪水预报精度。

4 结果与分析

4.1 雨量站网布设及评价

(1)锥体法分析

顺昌县按水系可分为富屯溪(干流)流域、仁寿溪流域、路兹溪流域、高阳河流域等 4 个主要流域,流域面积约占全县面积的 91%。针对上述主要流域分别采用锥体法进行雨量站网布设评价。各流域基本情况如表 1 所示。

顺昌县暴雨历时短、强度大、洪水暴涨暴落,取 1 h 作为雨量统计的时段长。顺昌县山洪灾害调查分析评价结果显示,富屯溪(干流)、仁寿溪、路兹溪和高阳河流域的下渗率分别为 2.4、2.4、2.2 和 2.3 mm/h,选取次降雨量能产生径流的雨量进行统计分析。雨量站网布设应满足各流域山洪灾害预警分析要求,即 80% 以上测次的 1 h 面雨量相对误差小于 $\pm 10\%$ ^[32]。

富屯溪(干流)流域分别以郑坊站($P_0=7.47$ mm)和光地站($P_0=7.74$ mm)为暴雨中心进行计算和验证,流域内需均匀设立 22~23 个雨量站;仁寿溪流域分别以河墩站($P_0=8.32$ mm)和仁寿站($P_0=7.82$ mm)为暴雨中心进行计算和验证,流域内需均匀设立 10~11 个雨量站;路兹溪流域分别以大历站($P_0=8.40$ mm)和建西站($P_0=6.78$ mm)为暴雨

表1 顺昌县主要流域水雨情站点情况

Tab. 1 Hydrometric network of four main catchments in Shunchang County

序号	流域	面积/km ²	下渗率/(mm/h)	已建测站数			应设测站数
				雨量站	水位站	密度/(km ² /站)	
1	富屯溪(干流)	614.74	2.4	7	17	25.6	22-23
2	仁寿溪	501.70	2.4	10	2	41.8	10-11
3	路兹溪	413.00	2.2	7	4	37.5	11
4	高阳河	267.00	2.3	3	1	66.7	4
合计		1796.44	-	27	24	35.2	-

中心进行计算和验证,流域内需均匀设立 11 个雨量站;高阳河流域分别以高阳站($P_0=4.73\text{ mm}$)和安浆站($P_0=2.28\text{ mm}$)为暴雨中心进行计算和验证,流域内需均匀设立 4 个雨量站。上述计算结果表明,目前顺昌县内各主要流域所建雨量站数基本满足各流域山洪灾害预警分析的精度要求。

(2)相关系数法分析

山洪预警通常采用泰森多边形法获得流域面雨量,为此,本文首先采用泰森多边形分析各站点的控制面积,然后对控制面积较大的站点进行邻近站点降雨量相关性分析。顺昌县内各雨量站对应的泰森多边形如图 2 所示,各雨量站控制面积为 5.15~176.75 km²。其中,雨量站对应的泰森多边形面积较大,且疏于县平均站网密度的站点为:安浆站(176.75 km²)、东坑站(129.09 km²)、武坊站(117.48 km²)、慈悲站(95.02 km²)、余塘站(87.84 km²)、南湖站(84.00 km²)、光地站(83.70 km²)和苦竹际站(82.65 km²)。其中,安浆站和东坑站对应的泰森多边形多位于县外,此处不做进一步分析。

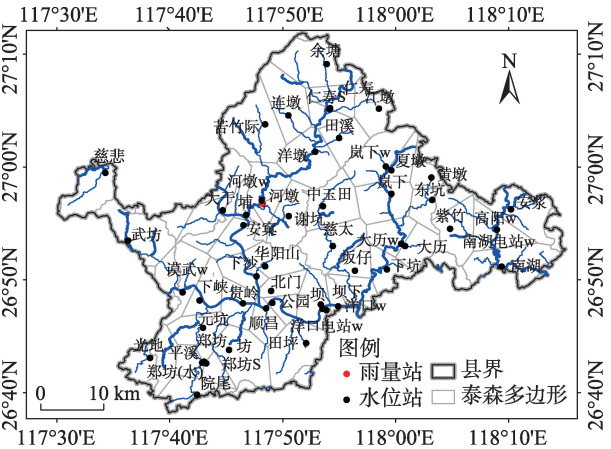


图2 顺昌县雨量站及对应的泰森多边形分布图

Fig. 2 Spatial distribution of rainfall stations and corresponding Thiessen polygons in Shunchang County

进一步分析上述测站与其相邻测站降雨特性的相关性(表 2)。总体而言,除武坊-慈悲($R=0.57$, $R_{0.6}=50\%$)、余塘-仁寿($R=0.36$, $R_{0.6}=30\%$)和余塘-连墩($R=0.59$, $R_{0.6}=44\%$)外,各邻近雨量站间降雨相关性较好($R>0.60$, $R_{0.6}>60\%$)。虽然武坊站与慈悲站的降雨量相关性较低,但区域内无村落分布,且不属于山洪灾害重点防治区范围(图 3),目前可不考虑增设站点。因此,为保证山洪灾害预警预报系统面雨量计算需求,可考虑在余塘站与仁寿站、连墩站间增设雨量站点(Ad1 站)。

一般而言,流域地形和下垫面条件等对暴雨的量级、强度等有较大影响^[45-46],水雨情站网布设应充分考虑流域下垫面空间分布的异质性,以及山地迎风坡和背风坡等微地貌的差异。本文主要是针对面向山洪灾害防御的站网布设方法研究,而且研究区地形、土地利用和土壤类型等条件空间异质性较

表2 邻近雨量站降雨特性相关分析结果

Tab. 2 Correlation analysis of rainfall properties among adjacent rainfall stations

序号	雨量站	A/km ²	邻近雨量站	降雨特性分析	
				R	R _{0.6} /%
1	武坊	117.48	慈悲	0.57	50
			漠武	0.65	62
			大干	0.73	75
2	慈悲	95.02	武坊	0.57	50
			仁寿	0.36	30
3	余塘	87.84	江墩	0.75	80
			连墩	0.59	44
4	南湖	84.00	高阳	0.82	100
			紫竹	0.76	83
5	光地	83.70	院尾	0.76	82
			洋墩	0.79	93

注:“A”为雨量站对应的泰森多边形面积;“R”为各雨量站与邻近雨量站所有场次降雨量相关系数的均值;“R_{0.6}”为各雨量站与邻近雨量站各场次降雨量相关系数不小于 0.60 的场次数比例

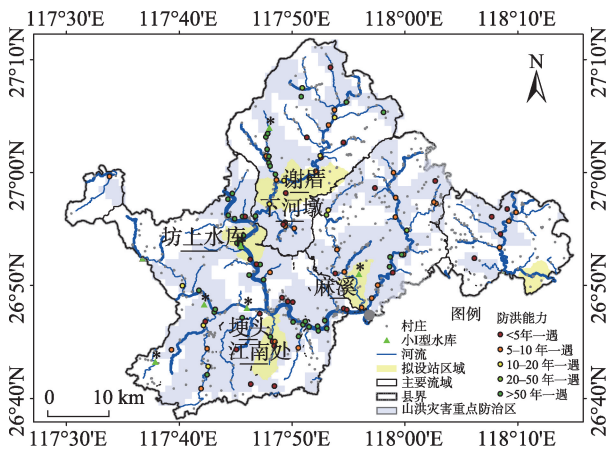


图3 顺昌县基于雨量、水位预警的拟设站区域及防护对象防洪能力分布图

Fig. 3 Regions of new stations based on rainfall/water stage warnings and flood control capacity of villages in Shunchang County

小,加之已有站网布设密度已较高,主要通过降雨相关系数法间接地反映上述因素对雨量站代表性的影响,今后可进一步加强流域地形和下垫面条件对水雨情站网布设方法影响的研究。

(3)雨量预警分析

对于山洪灾害重点防治区内防洪能力较弱,且分布有大量村庄、人口较为密集的区域,需增设测站提高预警能力。拟增设测站的区域如图3所示。其中,区域1(Ad2站)位于山洪灾害重点防治区;区域内有1个村庄(谢厝)的防洪能力小于5年一遇,2个村庄(路马头、土丰)的防洪能力为5-10年一遇;危险区人数超过400人。区域2(Ad3站)处于山洪灾害重点防治区范围;区域内有2个村庄(埂头、江南处)的防洪能力小于5年一遇,1个村庄(溪兰边)的防洪能力为5-6年一遇;相邻2个小流域内危险区总人口达100人;沿河村落分

布密集(2 km²/村)。区域3(Ad4站)内无雨量站,且沿河村落分布密集(3.3 km²/村)。

4.2 水位站网布设及评价

水位站的布设应考虑山洪灾害影响程度、影响范围、保护范围重要程度等实际情况。对于山洪灾害重点防治区内防洪能力较弱,且分布有大量村庄、人口较为密集的区域,考虑到下游防护对象的防洪和预警需求,需在防护对象上游增设水位站。拟增设测站的区域如图3所示。其中,仁寿河流域出口附近下河墩村防洪能力为10-20年一遇,危险区人口超过100人,沿河村落分布较为密集(2 km²/村)。根据顺昌县山洪灾害调查分析评价结果可知,该村成灾流量对应的断面平均流速为6 m/s,为保证下游防护对象水位预警时间不少于半小时,建议在距离下游防洪对象约11 km处增设水位站点(Az1站)。麻溪流域出口附近麻溪村防洪能力为5-10年一遇,沿河村落分布较为密集(2.56 km²/村)。该村成灾流量对应的断面平均流速为2 m/s,为保证下游防护对象水位预警时间不少于半小时,建议在距离下游防洪对象约4 km处增设水位站点(Az2站)。

除坊上水库外,流域内小I型水库和中型水库基本配套建设了水库水位站。坊上水库为小I型水库(库容为855.8万m³),且处于山洪灾害重点防治区内,其下游沿河村落分布较为密集(3.85 km²/村),为保障下游防护对象防洪安全,建议配套建设坊上水库水位站(Az3站)。

4.3 水雨情站网综合布设

根据上述分析结果,顺昌县水雨情站网布设建议如表3所示。建议分别增设雨量站4座、水位站3

表3 顺昌县水雨情站网布设建议

Tab. 3 Recommendations of new hydrometric stations in Shunchang County

	序号	增设测站	增设原因	位置
雨量站	1	Ad1	区域雨量站密度稀疏、已建雨量站与邻近雨量站的降雨相关性较弱,影响山洪灾害预警预报精度	仁寿镇苏屯村附近
	2	Ad2	位于山洪灾害重点防治区内、防洪能力较弱、沿河村落分布密集、危险区人口多	埔上镇沙口村上游
	3	Ad3		郑坊乡江南处村上游
	4	Ad4	无雨量站、沿河村落分布密集	高阳乡大垵村附近
水位站	1	Az1	位于山洪灾害重点防治区内、防洪能力较弱、沿河村落分布密集、危险区人口多,且坊上水库为小I型水库,增设水位站可用于下游水位预警,提高下游山洪灾害防洪预警能力	埔上镇沙口村上游
	2	Az2		建西镇麻溪村上游
	3	Az3		双溪街道新屯村上游

注:雨量站Ad2与水位站Az1距离较近,可合并为一个监测站,同时监测降雨和水位过程

座,由于增设雨量站Ad2与增设水位站Az1距离较近(约2 km),可将两站合并为一个水位监测站,可同时监测降雨和水位过程。因此,建议顺昌县增设雨量站3座,水位站3座,且保证一座水位站同时监测降雨过程。进行站网优化布设后,顺昌县共布设有31座雨量站,29座水位站,雨量站和水位站的布设密度分别为 $34\text{ km}^2/\text{站}$ 和 $68\text{ km}^2/\text{站}$,站网密度分别增加了8%和10%。

拟增设雨量站(Ad1~Ad4)较为均匀地分布于仁寿河流域、路兹河流域、富屯溪(干流)流域和高阳河流域内无雨量监测、区域防洪能力较弱、人口较为密集的山区支流上,各流域站网密度增加了4%~20%,提高了山洪灾害预警分析的精度要求。此外,余塘-仁寿、余塘-连墩等区域降雨特性受地形、下垫面条件等影响较大,增设雨量站(Ad1)后可保证汛期站网监测系统出现异常时的快速处理,也有利于捕捉区域降雨局地特性,提高山洪预警预报精度。

拟增设水位站(Az1~Az3)较为均匀地分布于仁寿河流域、路兹河流域和富屯溪(干流)流域内区域防洪能力较弱、人口较为密集的山区支流上,各流域站网密度增加了6%~33%,保证了下游防护对象的防洪安全和预警需求。此外,增设水位站Az3后,县内所有小I型水库和中型水库均配套建设了水位监测站,保证了下游防洪安全和水利工程设施安全,且预留了至少半个小时的水位预警时间。调整后的水雨情站网分布如图4所示。

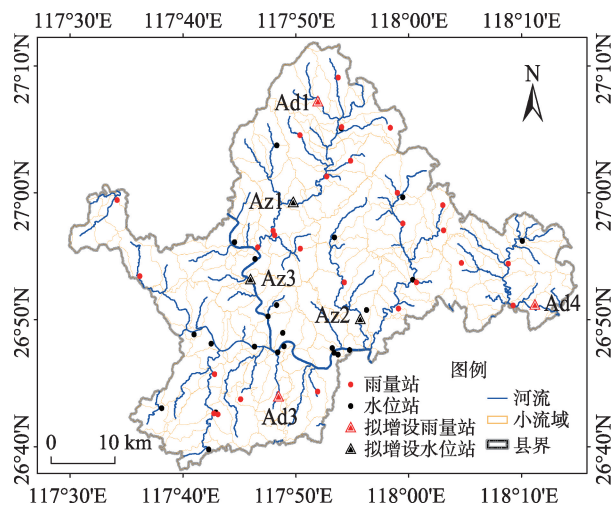


图4 顺昌县增设测站分布图

Fig. 4 Spatial distribution of new stations in Shunchang County

5 结论

本文基于历史降雨时空特征,结合山洪灾害影响程度、影响范围、保护范围重要程度等实际情况,以及山洪灾害预警预报系统建设的需求,以福建省顺昌县为例,对县内现有雨量站和水位站进行了合理性分析和优化布设研究。

(1)建议在降雨特性相关性较弱、下游防洪能力较弱且人口较为稠密的山洪灾害重点防治区内增设雨量站3座,增设水位站3座,满足下游防护对象的防洪和预警需求。

(2)对水雨情站网进行综合优化布设后,县内共布设有31座雨量站,29座水位站,雨量站和水位站密度分别为 $34\text{ km}^2/\text{站}$ 和 $68\text{ km}^2/\text{站}$,站网密度分别增加了8%和10%。

(3)文中提出的水雨情站网布设方法主要以山洪灾害预警预报为主要目标,也可用于中小河流洪水防御的站网布设研究。此外,今后应进一步加强流域地形和下垫面条件对水雨情站网布设方法影响的研究。

参考文献(References):

- [1] 马建华,胡维忠.我国山洪灾害防灾形势及防治对策[J]. 人民长江,2005,36(6):3-5. [Ma J H, Hu W Z. China's flash flood disaster and its control measures[J]. Yangtze River, 2005,36(6):3-5.]
- [2] 赵刚,庞博,徐宗学,等.中国山洪灾害危险性评价[J]. 水利学报,2016,47(9):1133-1142,1152. [Zhang G, Pang B, Xu Z X, et al. Assessment on the hazard of flash flood disasters in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(9):1133-1142,1152.]
- [3] Miao Q H, Yang D W, Yang H B, et al. Establishing a rainfall threshold for flash flood warnings in China's mountainous areas based on a distributed hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2016,541(Part A):371-386.
- [4] 张志彤.山洪灾害防治措施与成效[J]. 水利水电技术, 2016,47(1):1-5. [Zhang Z T. Mountain torrent disaster prevention and control measures and their effects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016,47(1):1-5.]
- [5] 舒大兴,韩金山.山洪灾害监测雨量站网密度分析探讨[J]. 水文,2011,31(5):64-67. [Shu D X, Han J S. Discussion on rainfall station network density of torrential disaster monitoring[J]. Journal of China Hydrology, 2011,31 (5):64-67.]
- [6] 何秉顺,严建华.山洪水位预警再认识[J]. 中国防汛抗旱,

- 2016,26(5):61-63. [He B S, Yan J H. Recognition of water stage warning for flash flood[J]. China Flood & Drought Management, 2016,26(5):61-63.]
- [7] Marra F, Zoccatelli D. Design of rain gauge networks for flash flood prediction: Assessment based on spatial moments of catchment rainfall[J]. EGU General Assembly, 2012,14:14480.
- [8] Johnson D, Smith M, Korean V, et al. Comparing mean areal precipitation estimates from NEXARD and rain gauge networks[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999,4(2):117-124.
- [9] WMO (World Meteorological Organization). The guide to hydrological practices, Volume I hydrology- from measurement to hydrological information[R]. WMO Publication No. 168, Sixth eds, 2008.
- [10] 何惠. 中国水文站网[J]. 水科学进展, 2010,21(4):460-465. [He H. Chinese gauging station net work[J]. Advances in Water Science, 2010,21(4):460-465.]
- [11] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 全国山洪灾害防治县级非工程措施建设管理总结报告[R]. 2013,7. [Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Report on the implementation and management of non-engineering measures at county level for flash flood disaster prevention and control[R]. 2013,7.]
- [12] 胡凤彬. 水文站网规划[M]. 南京: 河海大学出版社, 1993. [Hu F B. Hydrologic network design[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1993.]
- [13] 陆桂华, 蔡建元, 胡凤彬. 水文站网规划与优化[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001. [Lu G H, Cai J Y, Hu F B. Hydrologic network design and optimization[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2001.]
- [14] Mishra A K, Coulibaly P. Developments in hydrometric network design: A review[J]. Reviews of Geophysics, 2009,47, RG2001, doi:10.1029/2007RG000243.
- [15] Eagleson R. Optimum design of rainfall networks[J]. Water Resources Research, 1967,3(4):1021-1033.
- [16] Dymond J. Rain gauge network reduction[J]. Journal of Hydrology, 1982,57:81-91.
- [17] Morin G, Fortin J P, Sochanska W, et al. Use of principal component analysis to identify homogenous precipitation stations for optimal interpolation[J]. Water Resources Research, 1979,15(6):1841-1850.
- [18] Basalirwa C P K, Ogallo L J, Mutua F M. The design of a regional minimum rain gauge network[J]. International Journal of Water Resources Development, 1993,9(4):411-424.
- [19] Basist A, Bell G D, Meentemeyer V. Statistical relationships between topography and precipitation patterns[J]. Journal of Climate, 1994,7(9):1305-1315.
- [20] Skok G. Analytical and practical examples of estimating the average nearest-neighbor distance in a rain gauge network[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2006,15(5):565-573.
- [21] Moss M E, Tasker G D. An intercomparison of hydrological network-design technologies[J]. Hydrological Sciences Journal, 1991,36:209-221.
- [22] Bastin G, Lorent C D, Gevers M. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations[J]. Water Resources Research, 1984,20:463-470.
- [23] Wei C, Chiang J L, Wey T H, et al. Rain gauges network design using discrete entropy and Kriging approach[J]. EGU General Assembly, 2010,12:10421.
- [24] Husain T. Hydrologic network design formulation[J]. Canadian Water Resources Journal, 1987,12(1):44-59.
- [25] Yang Y, Burn D H. An entropy approach to data collection network design[J]. Journal of Hydrology, 1994,157:307-324.
- [26] 李禾澍, 王栋, 王远坤. 基于信息熵的多目标水文站网优化探讨[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017,53(2):326-332. [Li H S, Wang D, Wang Y K. Entropy-based multi-objective optimization for hydrologic networks[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2017,53(2):326-332.]
- [27] 黄河水利委员会水文处研究室. 基本雨量站网布设密度的分析方法-锥体法[J]. 水文, 1965(5):36-38. [Hydrology department of Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources. Analysis of basic rainfall station density-Cone method[J]. Journal of China Hydrology, 1965,5:36-38.]
- [28] 崔泰昌. 雨量站网密度分析几种方法之比较[J]. 山西水利, 2002(增刊):48-49. [Cui T C. Comparison of methods for rainfall station density calculation[J]. Shanxi Water Resources, 2002(supplement):48-49.]
- [29] 潘久根. 小流域雨量站网密度分析[J]. 四川联合大学学报(工程科学版), 1998,2(2):29-33. [Pan J G. Analysis of precipitation station network density of small watershed [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 1998,2(2):29-33.]
- [30] 宁德林. 锥体梯度法在九龙河小流域雨量站网规划中的应用[J]. 水资源研究, 2013,34(2):16-17. [Ning D L. Application of cone gradient method in rainfall station network design in Jiulong Watershed[J]. Journal of Water Resources Research, 2013,34(2):16-17.]
- [31] 史向前. 中小流域雨量站网密度规划与研究[J]. 水利技术监督, 2016(6):23-24, 80. [Shi X Q. Design and study of rainfall station density in small and medium watersheds[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2016,6:23-24, 80.]

- [32] SL34-92. 水文站网规划技术导则[S]. 中华人民共和国水利部, 1992. [SL34-92. Technical Regulations for Hydrologic Network Design[S]. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1992.]
- [33] 王富贵, 熊运阜, 白志刚. 黄河流域水保试验小流域雨量站布设密度分析[J]. 人民黄河, 1995(4):22-24. [Wang F G, Xiong Y F, Bai Z G. Analysis of rainfall station density of soil and water conservation watershed in Yellow River Basin[J]. Yellow River, 1995,4:22-24.]
- [34] 王巧平, 刘克岩. 锥体梯度法在雨量站网布设中的应用[J]. 水科学与工程技术, 2008(6):10-11. [Wang Q P, Liu K Y. The application in precipitation station layout with cone gradient method[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2008,6:10-11.]
- [35] 江西雨量站网分析组. 江西配套雨量站网密度公式初步探讨[J]. 水文, 1987(3):34-37. [Analysis group of Jiangxi rainfall station network. Preliminary discussion of rainfall station density equation in Jiangxi province[J]. Journal of China Hydrology, 1987,3:34-37.]
- [36] 张桂娇, 刘筱琴, 刘权授. 江西省中小河流雨量站网的合理布设[J]. 江西水利科技, 1990(4):5-15. [Zhang G J, Liu X Q, Liu Q S. The optimal design of rainfall station network of small and medium watersheds in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Hydraulic Science and Technology, 1990,4:5-15.]
- [37] 邵建敏, 丘汀萌. 福建省雨量站网密度分析[J]. 水文, 1997(增刊):41-43. [Shao J M, Qiu T M. Analysis of rainfall station network in Fujian province[J]. Journal of China Hydrology, 1997(supplement): 41-43.]
- [38] 王美荣, 任立良, 李春红. 基于数字流域的雨量站网空间布设研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003,31(2):196-199. [Wang M R, Ren L L, Li C H. Spatial analysis of rain-gauge network based on digital basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003,31(2):196-199.]
- [39] 李春红, 罗清标, 冯永修. 新丰江流域雨量站网分析论证[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008,32(3):74-76. [Li C H, Luo Q B, Feng Y X. Demonstration of rainfall network in Xinfengjiang drainage area[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008,32(3):74-76.]
- [40] 李笋开, 杨羽, 肖晓麟, 等. 吉安市山洪灾害特性与水情站网合理布设初探[J]. 人民长江, 2008,39(6):36-37,76. [Li S K, Yang Y, Xiao X L, et al. Preliminary discussion of flash flood disaster and hydrologic station network in Jian city[J]. Yangze River, 2008,39(6):36-37,76.]
- [41] 李进, 邓江, 戴文娟, 等. 一种山洪地质灾害雨量监测站布设方法介绍[C]. 第31届中国气象学会年会S10 第四届气象服务发展论坛—提高水文气象防灾减灾水平, 推动气象服务社会化发展, 北京, 2014. [Li J, Deng J, Dai W J, et al. A kind of setting method introduction to the rainfall stations of geological disasters from mountain torrents[C]. The 31th Chinese Meteorological Society S10 The fourth Weather Service Development Forum-Improving hydro-meteorological disaster prevention and reduction, promoting social development of meteorological services, Beijing, 2014.]
- [42] 全国山洪灾害防治规划领导小组办公室. 全国山洪灾害防治规划山洪灾害防治区水文气象站网布设原则[R]. 2004,10. [Office of National Flash Flood Disaster Prevention and Planning. Design principles of hydro-meteorological station networks in flash flood disaster prevention zone in national flash flood disaster prevention and control plan[R]. 2004,10.]
- [43] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 全国山洪灾害防治试点县实施方案编制大纲[R]. 2007,8. [Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Outline of implementation plan for national flash flood disaster prevention and control pilot county[R]. 2007,8.]
- [44] 国家防汛抗旱总指挥部办公室. 山洪灾害防治县级非工程措施建设实施方案[R]. 2010,8. [Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters. Implementation plan of non-engineering measures at county level for flash flood disaster prevention and control[R]. 2010,8.]
- [45] Yao J Q, Yang Q, Mao W Y, et al. Precipitation trend - Elevation relationship in arid regions of the China[J]. Global and Planetary Change, 2016,143:1-9.
- [46] Ding B H, Yang K, Qin J, et al. The dependence of precipitation types on surface elevation and meteorological conditions and its parameterization[J]. Journal of Hydrology, 2014,513:154-163.