

基于 FloodArea 的台州 10 kV 配网设施 暴雨灾害临界雨量研究

吴颖晖¹, 徐硕¹, 丁宇海¹, 陈杰²

(1. 国网浙江省电力公司台州供电公司, 浙江 台州 318000; 2. 国网浙江临海市供电公司, 浙江 台州 317000)

摘要: 目前, 由于台风和暴雨等强降雨极端天气而造成的暴雨灾害问题已呈频发之势, 很多城市对气候变化带来的突发极端天气灾害仍缺乏防范措施。部分城市基础建设的防范标准已经跟不上历史气候的变化, 如配网变电站和配电室等设施, 较易在洪涝灾害中发生故障。基于水动力学原理, 以降雨导致的有源淹没为基本假设, 利用高分辨率的地理信息数据和基于 FloodArea 模型的 GIS 栅格分析技术, 对台州地区由降雨造成的洪涝灾害进行淹没模拟计算。然后模拟不同降雨情景的淹没范围和水深。结合 10 kV 配网承灾体的信息分布情况, 确定研究区域内配网设备不同致灾等级下的临界面雨量。

关键词: FloodArea 模型; GIS 栅格分析技术; 暴雨灾害; 10 kV 配网; 临界雨量

Flash flood critical rainfall research of 10 kV electric distribution network infrastructure based on FloodArea model in Taizhou

WU Yinghui¹, XU Shuo¹, DING Yuhai¹, CHEN Jie²

(1. Taizhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Taizhou 318000, China;
2. State Grid Zhejiang Linhai Power Supply Company, Taizhou 317000, China)

Abstract: Recently, there is an increasing number of incidents, indicating that cities are suffering more from extreme weather events like typhoon and rainstorm. However some cities are still lacking of the protection of severe weather due to the climate change. It seems that the standard of hazard protection may be inadequate with the change of climate in the future, facilities like low voltage substations and distribution equipment may have a higher chance to breakdown during flooding events. Based on hydrodynamic theory, rainfall is assumed to be the main source of flooding. High resolution geographic information data and GIS grid analyzing technology based on FloodArea model are applied to make flooding simulation and calculation for flood disaster caused by rainfall in Taizhou area. And then the flooding area and depth of water of different rainfall scenes are simulated. Finally, combined the information distribution of disaster-bearing bodies of 10 kV electric distribution network, the critical rainfall to distribution network equipment under different levels causing disaster is determined.

Key words: FloodArea model; GIS grid analyzing technology; rainstorm disaster; 10 kV electric distribution network; critical rainfall

0 引言

浙江省地处东南沿海区域, 是台风登陆的频繁地带, 尤其是台州等地, 历年来台风、暴雨和洪涝等自然灾害已造成人民生命和财产的巨大的损失, 严重威胁着社会公共安全, 影响城市设备的稳定运

行^[1]。台州有着特殊的地理位置, 地处东南沿海, 是自然灾害频发的地区, 历年台风登陆地很多集中在此地。极端天气状况也给配网设备的运行带来了巨大的潜在危险^[2], 台风暴雨洪涝灾害每年都严重威胁着配网的安全, 并造成了不同程度的损害^[3]。

天气因素对输电网的影响不容忽视^[4]。造成现有电网故障的主要气象因素为台风和雷雨^[5], 暴雨和台风灾害的发生概率虽然较小, 但其极有可能造成群发性的断线与倒塔等电力灾害, 风险不容忽视^[6]。

暴雨灾害的影响一方面来自于风力带来的破坏,如:面向海口处和台风登陆前进方向的高山风口处的电网杆塔,因受到超过设计风速的强台风袭击,导致植被树干折倒,直接或间接地造成杆塔倒杆和折弯,引起线路跳闸;变电站内主变压器引下线受台风影响引起风偏放电,造成主变压器跳闸。另一个方面来自于强降雨,如雨水冲刷线路杆塔基础,引起杆塔倾斜甚至倒塔,洪水、滑坡和泥石流对变电站、配电室特别是地下开闭所带来严重影响,造成二次设备如端子箱和直流系统进水,引起继电保护装置不能正常工作或误动、拒动,甚至整个变电站停运^[6]。

为了适应环境变化所带来的影响,保障电力系统的可靠性、灵活性、智能性和可持续性,目前电网系统推出智能电网的概念,以适应社会的需求与发展^[7]。然而,现有电网系统对气象信息的应用仍然比较简单,少有针对电网事故监测预报预警的服务,部分地区虽接入了较详细的气象数据,但仍缺乏电力设备和气象灾害之间的关联评估模型^[8]。福建电网气象信息预警系统通过采集雷达、电力专用自动气象站和气象台网气象信息,对暴雨、台风、冰雪和大雾等及其可能对电网造成的灾害进行短时临近预报和预警的研究^[9]。另外,关于电力灾害应急能力评估和提升电力系统抗灾能力的措施也有相关研究,但对暴雨灾害仍缺乏有效的监测方法和手段^[10]。

台州电网系统存在不能及时监控和预报暴雨灾害,较难判断气象灾害发展趋势的问题。对于暴雨洪涝灾害,在缺少配网暴雨灾害历史统计数据的情况下,存在预警阈值指标制定的困难。因此,本文通过结合精细化的气象历史降雨数据和FloodArea淹没模型技术,对各类数据进行处理,之后分析并确定配网预警区域和降雨情景,然后采用FloodArea模型的降雨式情景进行淹没模拟,并得到不同雨量下的淹没范围和淹没水深,检验后的总体模拟效果较好。最终根据模拟的淹没深度,制定以配网变电站设备为主要承载体的不同等级临界面雨量。致灾临界面雨量的确定,不仅能够为电力设施的防范措施提供快速准确的防灾减灾依据^[11],还可提高电力部门应用系统的预警能力,从而保障台州当地电网配网的安全运行。

1 相关资料与方法

1.1 数据来源

本研究所采用的资料主要有台州地区2016年5月—2016年7月的逐小时降雨数据,30米分辨率的DEM(Digital Elevation Model)高程数据,30米分辨

率的土地利用数据,10 kV 输电线路台帐资料,线路、杆塔和变电站的分布情况以及线路周围的气象站、水文站与电力站数据。

1.2 研究方法

降雨是造成山洪和中小河流洪水等灾害的直接因素和主要激发条件,洪水和泥石流等又是造成电网设备破损的主要因素^[12]。临界面雨量是指降雨量或面雨量在一定的时间内,达到或超过某一临界值将导致洪水淹没并引发不同等级暴雨灾害的关键预警指标,其大小与地形、地貌以及承灾体特征等有关^[13]。确定了临界面雨量后,即可根据精细化的暴雨实况和预报数据,对未来降雨进行实时预警,提前做好防灾减灾的准备。因此在制定暴雨灾害临界雨量时,还需同时考虑其可能带来的其他附加灾害对台州地区配网的影响,确定灾害预警点,从而综合地对暴雨灾害进行评估和监测预警。

现有确定临界面雨量的方法主要为统计分析法、模型法(包括水文模型和水动力模型法)和类比法三种^[13]。本研究由于缺少水文流量数据,因此根据台州地区部分气象站、水文站和电力站的气象和水文数据,采用统计分析法和水动力模型法(FloodArea淹没模型)结合的方式,通过多种降雨情景,用率定好的淹没模型进行降雨情景模型,拟合出降雨量(面雨量)与水位之间的线性关系,从而得到多种降雨情景下的不同等级的临界面雨量^[14]。

1.2.1 面雨量的计算

流域面雨量计算的方法一般有简单算术平均法、泰森多边形法、反距离权重插值法、克里金方法和雷达定量降水估算(QPE)^[14]。本研究采用1 km分辨率的雷达定量降水估算数据计算流域面雨量。雷达定量降水估算主要通过融合雷达反射率观测数据和地面自动站雨量数据,获得定量降水估测产品。采用Z-I关系法,即

$$Z=al^b \quad (1)$$

式中: I 为降水量; Z 为雷达回波强度; a 、 b 系数通过分析天气雷达回波强度与对应的地面自动站的雨量关系得到^[15]。

1.2.2 FloodArea 淹没模型

FloodArea淹没模型^[16]是德国Geomer公司开发的依托于ArcGIS平台的水动力模型,目前已在20多个国家的洪水淹没相关的决策、科研和工程等部门得到应用。该模型已应用于浙江省中小河流域暴雨、洪涝灾害的预警与风险区划,并具有良好的动态演进模拟效果,实际受淹区域与情景有较好的吻合。由于气象部门和电力部门之间的沟通协调存在一定局限性,通常气象系统的灾害风险划分,未以配网

设备作为主要评估对象, 电力系统也缺乏气象防灾减灾信息技术的应用方法。因此, 该模型技术将配网信息与气象降雨信息相结合, 应用到电力配网设备的保护与防御工作中, 并确定配网设备的致灾临界雨量, 具有较大的创新性和工程实用价值。

FloodArea模型以模块形式与ArcGIS无缝集成, 基于GIS栅格数据的二维非恒定流水力模型原理, 同时考虑了一个栅格周围8个单元的16个方向。图1中相邻单元的水流宽度被认为是相等的, 位于对角线的单元, 以不同的长度算法来计算。

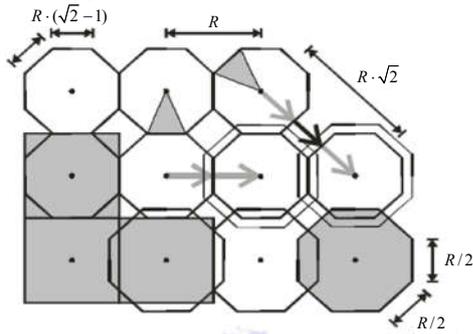


图 1 FloodArea汇流计算原理示意图

Fig. 1 Sketch map of convergence calculation principle for FloodArea model

水流方向由栅格间坡度决定, 坡度由单元之间最低的水位和最高的地形高程之间的差异所决定。对邻近单元的泻入量由Manning-Stricker公式计算, 即

$$V = k_{St} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (2)$$

式中: V 表示水量; k_{St} 为粗糙度; r_{hy} 为水力半径; I 代表坡度。

FloodArea模型支持3种情景模式(或混合模式), 包括河网漫顶式情景、溃口式情景和降雨式情景。河网漫顶式情景适用于因河水漫堤造成的洪水淹没, 其水量来源于发生漫堤的河流或水库; 溃口式情景适用于溃口造成的洪水淹没, 其水量来源于发生溃口的江河、堤坝、分洪口或水库, 其淹没范围、水深以及持续时间与容量、溃口大小和位置因素有关; 降雨式情景适用于因降雨过程导致的积水淹没, 其水量主要来源于降水^[17]。本研究采用第3种情景模式——降雨式情景, 根据面雨量过程分析计算降雨的区域空间分布和面雨量大小, 通过各个栅格增加的水量, 用曼宁公式依次迭代计算流向其他栅格的水量, 确定特定时间的淹没范围和积水深度, 最终对电网设备的承灾能力进行综合考虑, 确定研究区域内不同级别的临界雨量^[18]。其需将各类原始数据进行处理, 生成DEM数据、面雨量分布数据和

雨量数据等作为输入参数之后才可运行。FloodArea降雨式情景的计算流程图见图2。

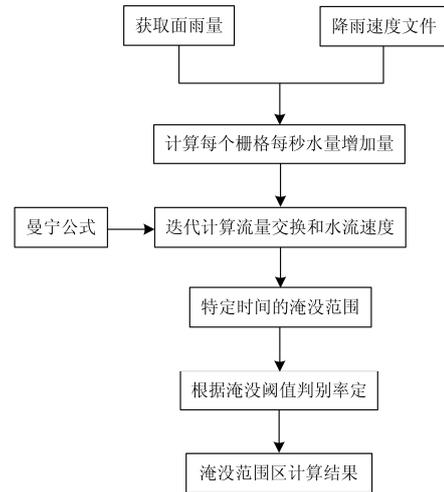


图 2 FloodArea模型降雨式情景计算流程框图

Fig. 2 Rainstorm simulation option flow chart of FloodArea model

1.2.3 地理信息数据

由于DEM地理数据的分辨率为30 m, 而普通水系实际的宽度往往小于30 m, 原有的DEM数据无法较好地体现部分河道水域的宽度与深度, 水系两旁的高程值与水系之间往往也不能体现出高程的差别, 因此需要对地理信息数据进行处理, 才能更好地体现河流水系的汇流情况^[19]。通过ArcGIS的水文模块, 需要首先将不同等级的河流与水域数据转换成相同分辨率的栅格文件, 并对河道栅格文件的高程属性进行赋值。然后将原DEM文件与河道栅格文件相减, 将主要河流与水域的高程根据其实际的宽度和深度下调2~5 m, 使得水系的DEM高程值低于其两边河岸的高程值^[17]。最后对处理后的DEM进行填洼、流向生成、给定出水口位置等步骤提取流域, 生成流域边界。DEM及水域情况见图3。

1.2.4 地表水力糙度

水力糙度指的是流体力学上的粗糙度, 也是衡量河道或冲沟边壁形状不规则性和粗糙程度影响的一个综合系数^[20]。由于地表土地类型的不同, 水在不同类型的土地上流动时所受到的阻力不同, 该数据为FloodArea模型的可选输入数据之一。本研究根据国家地理信息公共服务平台提供的天地图数据, 将台州地区的土地类型分为水体、人造地表(居民地)、耕地(水浇地)、森林(林地)和草地5种类型, 参考相关资料, 赋予其各自的地表水力糙度值^[17](见表1和图4), 并结合实际的模拟情况进行适当的调整。

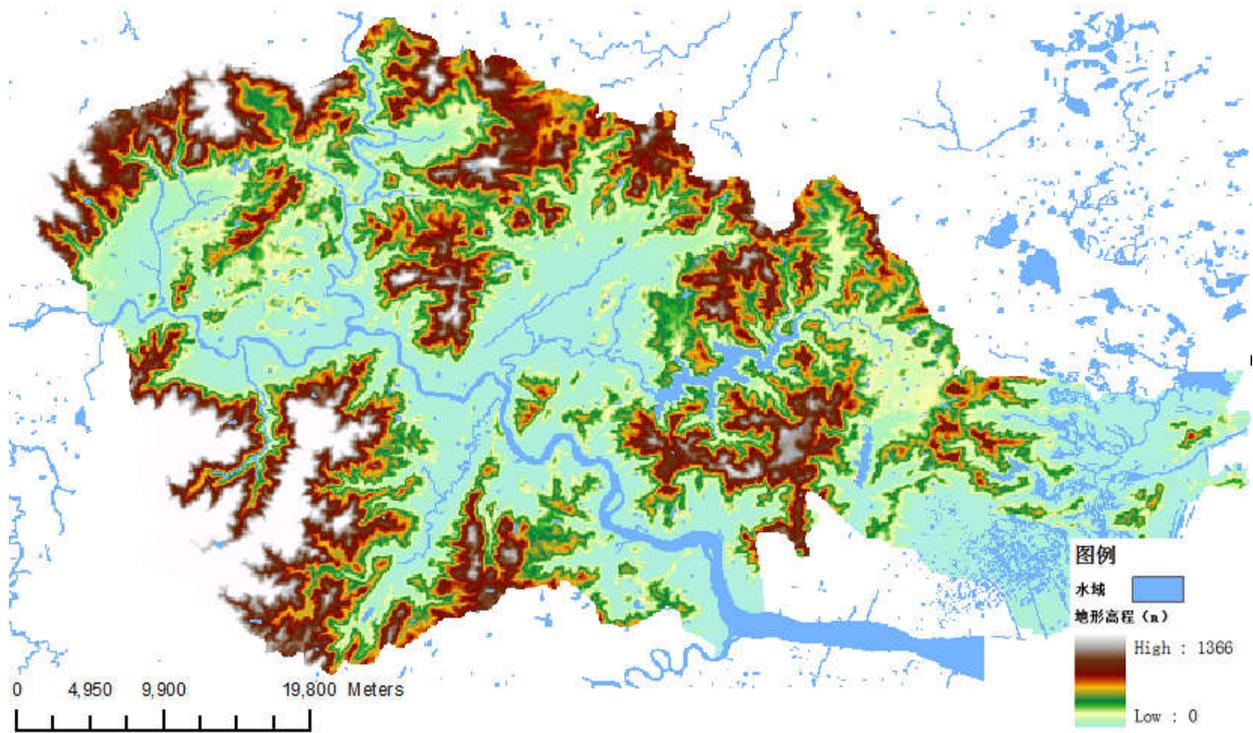


图3 台州临海区域DEM及水域示意图

Fig. 3 Sketch map of DEM and water area in Linhai, Taizhou

表1 土地利用类型及糙率

Table 1 Land utilization types and roughness coefficient

土地类型	水体	人造地表	耕地	森林	草地
Pixel 值	33	13	20	12	25
Manning 糙率	0.03	0.08	0.05	0.083	0.04



图4 台州临海区域土地类型图

Fig. 4 Map of land types in Linhai, Taizhou

1.2.5 降雨情景确定

由于气象因素的不均匀分布以及其不确定性对输电网的影响不同^[21]，在确定降雨情景前，首先需要降雨预警区域，然后再根据选择的预警区域确定降雨情景的时间。降雨预警点主要与各类配网数

据以及其周围的水文站位置分布情况和历史资料有关。为保证有效性，选定水文站周边配网分布较密集，且易发生山洪和滑坡等地质灾害的区域作为重点预警区域，主要位于台州临海区中部及西北部区域，其周围的水文站作为数据参考站。之后遍历各个站点的历史水文数据，从中筛选出变化较大的时刻进行汇总，再从中汇总的数据中筛选出固定时刻下各个水文站基本都存在较大水位变化的时间点，最后选定该类时刻作为降雨情景的研究样本数据，进行FloodArea模型的历史模拟分析，同时验证模型的可靠性。水文站历史水位数据详情见表2，台州配网及各类站点信息分布见图5。

在确定了降雨情景的时间要素之后，即可确定降雨情景的降雨强度(雨量)要素和降雨空间分布(雨型分布)要素(雨量和雨型分布为FloodArea淹没模型的必要输入参数)。FloodArea模型中各图层的栅格大小应尽量相同，因此降雨雨型分布栅格图可对雷达估测降水数据(QPE)进行插值后得到。面雨量数据即FloodArea模型的逐时降雨输入文件，按模型的要求，可由雷达估测降水数据得到，或采用泰森多边形法计算雨量，该方法通过分析研究区域内各个气象站点所代表的多边形面积，根据各个泰森多边形的面积权重系数，计算得出面雨量^[22]。

表 2 水文站历史水位数据表

Table 2 Historical water level data of hydrological station

时间	大田港闸站	括苍站	马横溪站	三洞桥站	狮子山水库站	双楼站
2016/7/10 7:00	2	10	12	22	17.5	9
2016/6/29 11:00	0	22	16.5	0	0	19
2016/6/29 12:00	16.5	0	4.5	18	12.5	0
2016/6/15 23:00	19	0	21	16	14.5	11.5
2016/5/29 2:00	23	0	19	23	28	8
2016/5/15 19:00	25.5	39	42.5	14	31	18.5
2016/5/3 0:00	20	3.5	6	15.5	15	2.5
2016/5/2 23:00	12.5	13	15	4	5	20.5

单位: cm

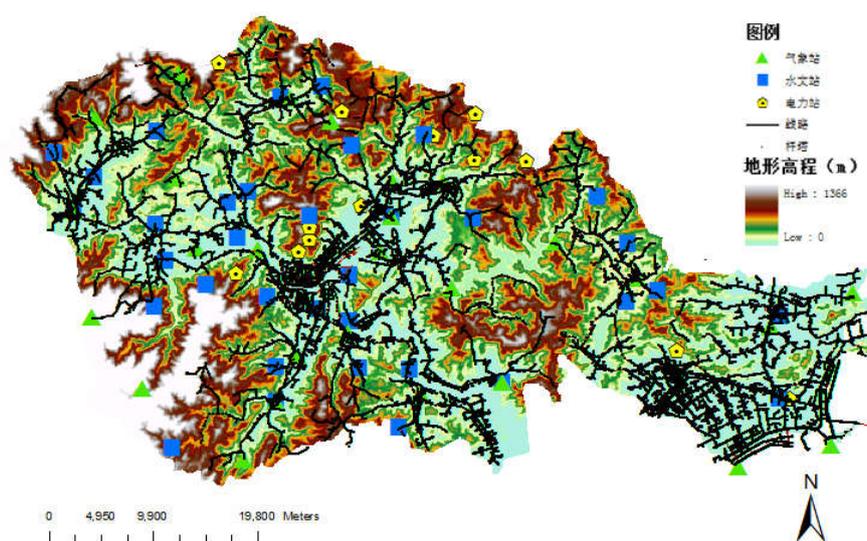


图 5 台州临海地区配网及各类站点信息分布图

Fig. 5 Distribution map of various stations in Linhai, Taizhou

2 历史再现模拟

将各个不同降雨情景的降雨数据进行处理, 得到FloodArea模型的输入数据后, 即对历史降雨进行情景模拟。运用FloodArea模型计算时, 在根据历史的水文站数据验证该模型在不同降雨情景下的适用性的同时, 根据实际模拟情况选择不同的最大交换率参数, 模型的初始最大交换率为1%, 经过多次模拟后, 率定当最大交换率为2%时, 可得到较好的模拟效果。

2016年5月15日傍晚, 台州出现少见的短时强降雨天气, 部分监测站点短时降水超过200 mm, 水库蓄水率平均达到80%以上。由于此次降雨的过程较短, 实况的气象站与电力站的历史监测为1 h一次间隔地观测数据, 所以观测的序列文件也相对较短, 逐时雨量序列见图6。此次降雨的最大雨量出现于当

日的19:00, 降水量达到200 mm, 根据淹没范围和淹没深度结果来看, 部分变电站受到不同程度的淹没, 该降雨过程的各时段模型淹没模拟情况见图7。从图7中可以看出, FloodArea模拟较好地呈现了此次降水的动态演进过程, 模拟结果与之前收集的水文站历史数据进行对比验证, 模拟效果与实际受淹区域情况有较好的吻合。

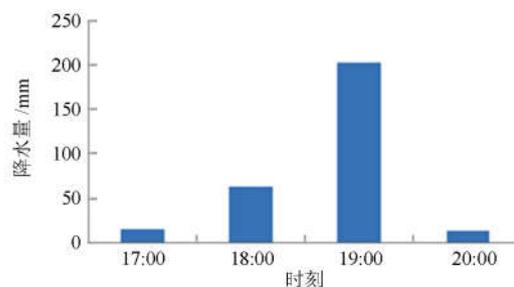


图 6 2016年5月15日台州市临海区逐时雨量图

Fig. 6 Hourly surface precipitation on 15th May, 2016

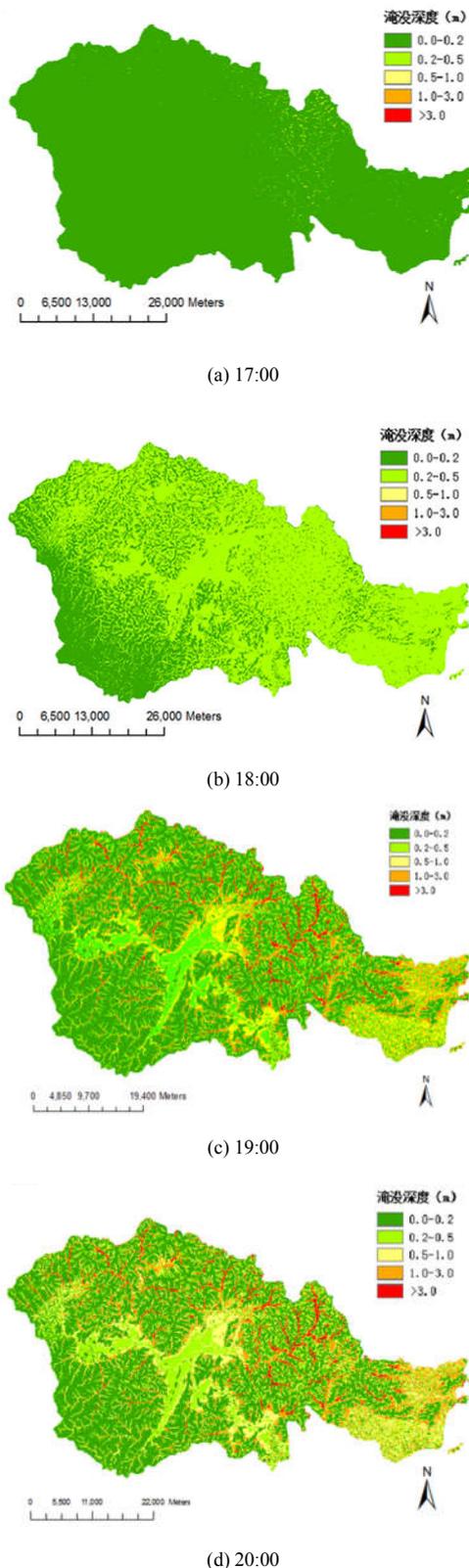


图 7 2016年5月15日17时台州市临海区降雨过程淹没模拟图

Fig. 7 Flooding simulation of precipitation process on 15th May 2016 in Linhai, Taizhou

3 临界雨量确定

由于缺少足够的水文流量资料，但有水文水位数据，临界雨量的确定，首先需要将之前已确定的各个降雨情景的参数输入FloodArea模型，分别进行历史再现模拟。然后根据预警区域水文站的历史记录数据，对模拟数据与历史数据进行效果检验，结合各个变电站的最大淹没深度和范围情况，通过多次模拟，找出短时暴雨灾害过程中模拟情况与水文站历史数据检验误差相对较小的降雨情景文件(合格率大于等于60%)，并将其作为模型的雨型输入文件。最后在不同降雨情景下，用率定好的淹没模型进行短时暴雨灾害的淹没模拟，重点模拟不同降雨强度下的淹没范围和深度。

在降雨情景中，2016年5月15日降雨情景较好地模拟了强降雨下的预警区域淹没情况。在对选定预警区域的各个变电站淹没深度进行取值时，存在部分变电站区域涵盖多个栅格数据的情况，此时以各栅格格点淹没深度的均值代表其淹没深度。根据模拟结果，其中：上盘变电站和涌泉变电站淹没深度为0.4 m；川南变电站淹没深度为0.5 m；许墅变电站和桐峙变电站淹没深度均为0.7 m；东塍变电站淹没深度为0.8 m；镜都变电站淹没深度为1 m；杜桥变电站淹没深度为1 m；杜桥变电站和大石变电站的模拟淹没深度较高，分别达到2.6 m和2.8 m。考虑到土地利用类型和变电站具有一定排水能力，且模型计算过程和雷达定量降水估测(QPE)数据存在偏差(通常强降雨下，雷达定量降水计算的面雨量会小于实测降雨计算的面雨量)，部分区域模拟结果需结合实际情况进行校订，最后确定各变电站的最大淹没深度分别超过0.5 m、1 m、1.8 m、2.8 m时，所对应的预警等级由低到高分别为：IV级、III级、II级和I级。

根据选定预警区域内淹没范围的最大淹没深度与降水量之间的关系，分别对1 h和2 h的淹没深度进行线性回归分析，雨量与淹没深度的散点图见图8、图9。

雨量与1 h、2 h的淹没深度的线性关系式分别为

$$y = 0.0005x^2 - 0.041x + 1.3515 \quad (3)$$

$$y = 0.0001x^2 - 0.0147x + 1.0343 \quad (4)$$

两式中y均表示淹没深度；式(3)中x为1 h雨量值，式(4)中x为2 h雨量值。

根据得到的关系式，并结合FloodArea的模拟结果，反算出各变电站的最大淹没深度超过0.5 m、1 m、

1.8 m、2.8 m时的降雨强度, 最终的1 h、2 h致灾临界雨量值见表3。

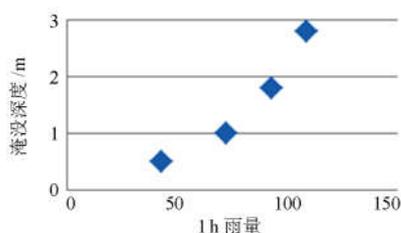


图 8 1 h 雨量与淹没深度散点图

Fig. 8 1 hour precipitation and water depth scatterplot

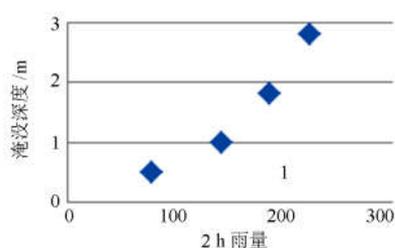


图 9 2 h 雨量与淹没深度散点图

Fig. 9 Precipitation and water depth scatterplot of 2 hours

表 3 1 h、2 h 致灾临界雨量

Table 3 Critical precipitation causing disaster of 1 and 2 hours

单位: mm				
时间	IV 级	III 级	II 级	I 级
1 h	43	72	93	109
2 h	78	143	187	224

4 结论

根据台州临海区的地理信息、10 kV配网信息、气象和水文数据等, 对不同降雨强度下的降雨情景进行模型率定、淹没模拟和雨量反算等操作, 线性拟合不同时间的雨量与淹没深度之间的关系。之后, 根据配网设备在不同条件下的积水承灾能力, 对易出现积涝隐患的变电站进行预警, 并确定暴雨条件下不同等级的预警致灾临界雨量。

FloodArea模型的输入参数虽然不多, 但其模拟一次的人工数据处理过程较复杂, 且在降雨范围广和逐时面雨量大, 即出现大范围强降雨的情况下, 计算机模拟一次降雨过程往往需要较长时间, 因而可能会影响暴雨灾害防范预警的时效性。未来可考虑发挥Python脚本在运维方面的优势, 并借助Arcpy+GDAL库打通整体业务流程, 实现计算机对各类数据的预处理以及其对FloodArea模型的实时自动模拟演算步骤, 减少人工干预, 简化人工操作,

实现高度自动化的计算机系统模块, 将结果引入其他可用到的预警系统平台, 实现成果的更好应用。

参考文献

- [1] 杨秀静, 谭聪睿. 北京“7·21”暴雨引发的城市防洪排涝建设思考[J]. 海河水利, 2013(1): 41-42.
YANG Xiuqing, TAN Congrui. Thoughts about urban flood control and drainage construction caused by rainstorm in Beijing “7.21”[J]. Haihe Water Resources, 2013(1): 41-42.
- [2] 秦砺寒, 陈丹, 李顺昕, 等. 面向配电网可靠性评估的输电网等值方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 71-76.
QIN Lihan, CHEN Dan, LI Shunxin, et al. An equivalent method of transmission system for distribution network reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 71-76.
- [3] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 1-8.
SONG Xiaozhe, WANG Zhen, GAN Deqiang, et al. Transient stability risk assessment of power grid under typhoon weather[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [4] 李小燕, 丁明, 齐先军. 考虑天气因素的输电网可靠性区间评估及其仿射算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 8-13.
LI Xiaoyan, DING Ming, QI Xianjun. Interval reliability evaluation and affine arithmetic of transmission network considering weather factors[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 8-13.
- [5] 方丽华, 熊小伏, 方嵩, 等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 113-119.
FANG Lihua, XIONG Xiaofu, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 113-119.
- [6] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2): 20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 20-29.
- [7] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 13pp.

- DOI 10.1186/s41601-016-0024-y
- [8] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [9] 张继芬, 张世钦, 胡永洪. 福建电网气象信息预警系统的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 72-74.
ZHANG Jifen, ZHANG Shiqin, HU Yonghong. Design of the meteorological forewarning system for power grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 72-74.
- [10] 常康, 薛峰, 吴勇军, 等. 暴雨影响电网安全的机理及其在线防御技术[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 6-10.
CHANG Kang, XUE Feng, WU Yongjun, et al. Impact of rainstorm on power grid and its online blackout defense technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 6-10.
- [11] 尹占娥, 许世远, 殷杰, 等. 基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 553-562.
YIN Zhane, XU Shiyuan, YIN Jie, et al. Small-scale based scenario modeling and disaster risk assessment of urban rainstorm water-logging[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 553-562.
- [12] 李哲, 梁允, 熊小伏, 等. 基于层次分析法的输电线路塔基降雨滑坡预警方法[J]. 智能电网, 2014, 2(9): 29-33.
LI Zhe, LIANG Yun, XIONG Xiaofu, et al. A rainfall caused landslide early-warning method for transmission line tower based on analytic hierarchy process[J]. Smart Grid, 2014, 2(9): 29-33.
- [13] 张荣焱, 章国材, 章毅之. 暴雨诱发的山洪风险预警服务业务技术指南[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [14] 杜迎燕. 基于网格的面雨量实时计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
DU Yingyan. Research on grid based real-time area rainfall calculation method[D]. Nanjing: Hohai University, 2016.
- [15] 汪瑛, 冯业荣, 蔡锦辉, 等. 雷达定量降水动态分级 Z—I 关系估算方法[J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 601-608.
WANG Ying, FENG Yerong, CAI Jinhui, et al. An approach for radar quantitative precipitation estimate based on categorical Z—I relations[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 601-608.
- [16] GEOMER. Floodarea-Arcview extension for calculating flooded areas[J]. User Manual Version 9.0. Heidelberg: Heidelberg University, 2005.
- [17] 刘鸣彦. 基于 FloodArea 模型的洪水致灾临界雨量确定[C] // 第 32 届中国气象学会年会 s7 水文气象预报最新理论方法及应用研究, 2015.
LIU Mingyan. FloodArea model based flood hazard critical precipitation determination[C] // The 32nd Chinese Meteorological Society s7 the Latest Hydrology Weather Forecast Theoretical Method and Applied Research, 2015.
- [18] 周月华, 田红, 李兰. 暴雨诱发的中小河流洪水风险预警服务业务技术指南[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [19] 姜智怀, 章毅之, 蔡哲, 等. 基于嵌入河道栅格的山洪灾害淹没模拟[J]. 气象, 2014(8): 1013-1018.
JIANG Zhihui, ZHANG Yizhi, CAI Zhe, et al. Simulation of flood disasters based on embedded river raster[J]. Meteorological Monthly, 2014(8): 1013-1018.
- [20] 刘义花, 鲁延荣, 周强, 等. 基于 GIS 栅格数据的青海省羊智沟洪水动态模拟[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 169-174.
LIU Yihua, LU Yanrong, ZHOU Qiang, et al. GIS raster data-based dynamic flood risk simulation model of Yangzhi Ditch in Qinghai Province[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(3): 169-174.
- [21] 熊小伏, 恭秀芬, 王燕祥. 输电网可靠性评估中基于气象因素的处理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 32-37.
XIONG Xiaofu, GONG Xiufen, WANG Yanxiang. A method for transmission network reliability evaluation considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 32-37.
- [22] 游立军, 张容焱, 唐振飞, 等. 基于水文模型及水动力模型的山洪临界雨量研究[C] // 气象服务发展论坛, 2014.
YOU Lijun, ZHANG Rongyan, TANG Zhenfei, et al. Flash flood critical rainfall study based on hydrological model and hydrodynamic model[C] // Meteorology Service Development Forum, 2014.

收稿日期: 2016-09-11; 修回日期: 2016-12-03

作者简介:

吴颖晖(1982—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力防灾减灾. E-mail: wuyinghui@139.com

(编辑 葛艳娜)