

西藏东南部山洪灾害过程水文动力模拟和临界雨量

林志强¹, 尼玛吉¹, 黄志诚²

(1. 西藏自治区气候中心, 西藏 拉萨 850000; 2. 西藏自治区气象局信息网络中心, 西藏 拉萨 850000)

摘要: [目的] 研究西藏山洪致灾临界雨量确定方法, 为西藏地区水文气象预警提供基础数据资料, 以服务于高原山洪灾害防御工作。[方法] 采用水文动力模式 Floodarea 模型对西藏东南部的一次山洪过程进行模拟研究, 并利用气象资料逐时降水量进行了淹没高度计算, 得到了山洪致灾临界雨量。通过实地考察获取西藏自治区林芝市巴宜区 2015 年 8 月一次山洪灾害的基本参数资料, 与模型模拟研究结果进行对比分析和模型验证。[结果] (1) Floodarea 对暴雨诱发山洪过程的模拟结果较好, 结合多源降水数据能更准确地模拟西藏山区山洪暴发的过程; (2) 通过调整雨量情景设定可推算山洪不同淹没水深的临界雨量, 得到较为准确的洪水淹没范围和降雨量—淹没深度关系; (3) 应用降雨量—淹没深度关系计算得到巴宜区永久河山洪沟的 4 个淹没深度灾害山洪等级(0.1, 0.6, 1.2, 1.8 m)的 6 h 累计临界雨量分别为 33, 55.7, 75.4, 91.9 mm。[结论] 研究结果表明 Floodarea 软件适用于西藏高原水文观测资料匮乏的复杂地形山区, 能较准确地重现山洪灾害过程和确定山洪临界雨量, 可为复杂地形山区山洪防治和预警提供参考。

关键词: Floodarea 模型; 西藏林芝; 山洪; 临界雨量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0183-05

中图分类号: P339

文献参数: 林志强, 尼玛吉, 黄志诚. 西藏东南部山洪灾害过程水文动力模拟和临界雨量[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):183-187. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.033; Lin Zhiqiang, Nimaji, Huang Zhicheng, et al. Hydrological dynamics simulation and critical rainfall for flash flood in Southeastern Tibet[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):183-187. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.033

Hydrological Dynamics Simulation and Critical Rainfall for Flash Flood in Southeastern Tibet

LIN Zhiqiang¹, Nimaji¹, HUANG Zhicheng²

(1. Climate Center of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China; 2. Meteorology Information Network Center, Meteorological Bureau of the Tibetan Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: [Objective] In this paper, we aimed to determine the critical rainfall of flash flood in Tibet, in order to provide the basic data for hydrological and meteorological warning in Tibet and serve the flash flood prevention. [Methods] We simulated the process of a flood in Southeastern Tibet by hydrodynamic model Floodarea, and calculated the submergence depth by using meteorological data of hourly precipitation, and we then obtained the critical rainfall of flash flood. To test the simulation result, we conducted a field survey to obtain the basic parameter of a flash flood disaster in August 2015 in Bayi Nyingchi region. [Results] The Floodarea model could be well used in the simulation of rainfall induced mountain flood process. The critical rainfall of flood submerged in different water depth could be calculated by adjusting the rainfall scenarios. According to the relationships between rainfall amount and submergence depth, the critical 6 hours accumulated rainfall amounts in four mountain flood ditches with different submergence depths(0.1, 0.5, 1.2, 1.8 m) were 33, 55.7, 75.4 and 91.9 mm, respectively. [Conclusion] Floodarea model software can be applied in the complex terrain mountainous areas that lack of hydrological observation data, in Tibetan Plateau. It can accurately simulate the flash flood disaster process and determine the critical rainfall. This study can pro-

收稿日期: 2016-05-05

修回日期: 2016-06-11

资助项目: 第三次青藏高原资助项目专题“西藏高原灾害性天气分析和预报方法研究”(GYHY201406001); 中国气象局业务建设项目“西藏暴雨洪涝灾害风险评估”

第一作者: 林志强(1982—), 男(汉族), 福建省漳州市人, 硕士, 工程师, 主要从事西藏气候分析工作。E-mail: linzq82@gmail.com。

vide reference for flood prevention and early warning in complex terrain mountainous areas.

Keywords: Floodarea model; Nyingchi prefecture in Tibet; flash flood; critical rainfall

山洪是发生在山区沟谷或河道地形的突发性洪水,多为短历时强降雨造成,具有持续时间短、能量集中、破坏性大,难以预防等特点,山洪及其诱发的泥石流和滑坡等次生灾害常造成人员伤亡,冲毁房屋、田地、道路桥梁,甚至能导致水坝溃决,是国民经济和人民生命财产安全的重大威胁^[1-3]。西藏地区地处中国西南边陲,是青藏高原的主体,向有“亚洲水塔”之美称,中国的主要大河长江、黄河、怒江、金沙江都起源于西藏,雅鲁藏布江、狮泉河、象泉河、澜沧江等河流还流向南亚、东南亚国家,这些河流和淡水资源是下游地区生态和经济的生命线,为数以亿计的下游人民提供生存和发展所需的核心资源^[4],由于西藏地区地形复杂、地层岩性多变、构造运动频繁,地形陡峭、切割破碎,生态环境脆弱,山洪灾害是影响西藏经济发展、基础工程建设和人民生命财产安全的主要气象灾害之一^[5]。在气候变暖的背景下,西藏地区极端降水事件发生频繁^[6],加之冰川退化,山洪灾害的发生越来越频繁,影响越来越严重。如何减轻山洪灾害的影响,保障西藏生态安全屏障建设是西藏气象工作者责无旁贷的重任。

致灾临界雨量阈值是山洪预报预警的关键指标之一^[7];当小流域范围内的降雨量达到或超过一定量级,形成的山洪流量超出河道的安全泄洪能力,该雨量即为致灾临界面雨量。结合准确的区域定量雨量预报和致灾临界面雨量,气象部门即可向社会和决策部门提供较为准确的山洪预警服务。基于精细 DEM 数据的洪水动态水文模拟^[8-10]可以较为准确地分析山洪的发生和发展过程,模拟不同雨量量级的淹没范围和水深,是一种成熟的致灾临界雨量研究方案,已在中国不同区域得到了应用:张明达等^[11]利用 Floodarea 模型分析了云南宣威 2012 年“7·12”山洪灾害淹没高度,并得到不同等级山洪灾害临界面雨量;姬兴杰等^[12]模拟了豫西山区无水文资料的暴雨诱发山洪过程,通过雨量情景设定方法确定了洛河上游地区 4 种雨量分配方式下的致灾临界雨量;张磊等^[13]针对缺乏水文资料但有历史洪水淹没记录的山区小流域进行山洪风险雨量计算,实现山洪灾害精细化风险评估;谢五三等^[14]利用 Floodarea 模型模拟了安徽大通河流域的暴雨淹没情景,模拟值和实际的淹没过程较为吻合;姜智怀等^[15]分析了江西省曹水流域降水导致山洪过程的推进路线、淹没范围和淹没水深,表明 Floodarea 模型嵌入河道栅格方法可用于推

算曹水流域致灾临界雨量;文明章等^[16]利用 Floodarea 再现了福建上清溪流域无水文资料山区的山洪过程,通过模拟结果水深和雨量相关关系推算流域受灾隐患点不同等级淹没水深的临界雨量;叶丽梅等^[17]依据蓄满产流平衡原理和暴雨洪涝淹没模型对通城县一次强降水造成的洪涝淹没水深和范围进行了模拟。最近,刘义花等^[18]对青海省羊智沟的洪水动态模拟表明 Floodarea 能适用于青藏高原这样的复杂地形地区的山洪模拟,尤其是 Floodarea 模型可以适用于无水文观测资料地区山洪分析,这尤其适用于地广人稀、观测资料匮乏的西藏地区,本文拟采用该模型通过对西藏东南部山洪灾害过程分析,探讨西藏地区山洪致灾临界雨量研究,为水文气象预警提供基础数据资料,为防御山洪灾害提供参考。

1 灾害过程概况

本研究选取的山洪沟位于西藏自治区林芝市巴宜区,山洪发生灾害点位于 94°21′38.69″E,纬度:29°36′07.61″N,海拔高度 2 984 m。林芝地处西藏东南部,南接喜马拉雅山脉,北靠念青唐古拉山脉,东连横断山脉,位于雅鲁藏布江下游地区,主要有帕隆藏布和尼洋河,高山峡谷相间,多陡峻峡谷,侵蚀强烈,是地质灾害的多发区^[19]。林芝属于高山温湿季风气候,印度洋暖湿气流在夏季西南季风驱动下沿雅鲁藏布江河谷北上^[20],形成较为丰沛的降水,植被生长茂盛,有“雪域江南”之誉,也是广受游客喜爱的旅游目的地。林芝山洪灾害多由强降水引发,多发于 5—9 月的汛期,山高坡陡,山洪汇流快、成灾迅猛。由于林芝地处川藏交界,是入藏出藏重要交通干道,山洪及其次生地质灾害往往造成交通中断,甚至是严重的交通事故,是旅游事业发展的重大威胁。

2015 年 8 月 17—19 日,在西太副高、孟加拉暖湿气流输送和西风槽东移的综合影响下,西藏中东部地区大部持续强降水,其中林芝市多地有大到暴雨过程,其中林芝、波密和米林 3 个气象站的日降水量打破了有气象站记录以来的日降水量极值,此次过程按照林志强等^[6]的环流分型,属于典型的西太副高西伸型。强降水造成 318 国道一钢便桥被山洪冲毁,致交通中断达 20 余天;山洪引发泥石流灾害,导致地处永久河边永久村的部分道路、桥梁、交通工具和房屋、店铺等不同程度损毁,所幸未造成人员伤亡。此次山洪及其次生灾害过程共造成直接经济损失 900 多万元,间接经济损失达 2 000 多万元。与其他山洪灾害相

比,由于灾害发生地点距聚居区较近,有道路施工人员见证过程,为西藏东南部山区的山洪灾害分析提供了宝贵的资料。

2 资料和方法

2.1 灾害调查

由于研究区域地形起伏较大,不同的研究地点将导致淹没深度变化,因此本文将以垮塌钢便桥和永久河附近为致灾临界雨量的淹没深度参考区,由于河道无防护堤,淹没水深为基于河道测量的水深。由于山洪暴发过程时间短,灾害强,亲历者并不是专业气象、

水文工作人员,因此很多信息并不完整,以山洪灾害发生时受洪水淹没的桥体设施和附近的树木、施工简易设施等淹没痕迹进行实地测量,并进行相应的实地灾害调查,准确记录淹没点的位置,包括经度、纬度、海拔高度、最大淹没深度等信息。

附近村民和抢险施工人员和资料查询,并通过多方信息相互印证,得到尽可能准确的淹没过程信息,由于无法确定淹没水深随时间的变化,因此采取多点测量灾害过程中淹没迹线获取最大淹没深度的方法,与模拟时段得到的最大淹没深度进行对比(表 1)。

表 1 山洪淹没深度调查信息

编号	地点	经度(E)	纬度(N)	海拔高度/m	地物	淹没水深/m
1	钢便桥	94°21'38.69"	29°36'07.61"	2 984	河床	2.6
2	国道	94°21'30.03"	29°36'12.68"	2 982	公路	0.3
3	永久村	94°21'24.48"	29°36'13.83"	2 991	民户	0.1
4	永久河	94°20'34.18"	29°34'58.15"	3 220	河床	0.7
5	渥罗帮嘎村	94°21'39.64"	29°35'52.06"	3 018	民户	0
6	色丁村	94°15'19.64"	29°43'35.82"	3 021	灌木丛	0
7	仲萨村	94°15'03.69"	29°44'38.21"	3 039	沙滩	0.5
8	那岗村	94°23'36.97"	29°36'26.47"	2 986	河床	3.0
9	东如村	94°20'37.08"	29°39'08.90"	2 998	沙滩	0.5
10	色龙村	94°10'12.91"	29°44'10.36"	3 062	公路	0

2.2 气象和地理信息数据

本文采用的降水数据为西藏自治区气象局信息网络中心提供的自动气象站逐小时降水观测数据,为弥补气象观测站不足,采用 CMORPH(CPC MORPHing technique)多卫星观测融合降水数据作为降水观测的补充,以往的研究表明^[10],结合 CMORPH 数据和站点观测能更准确地反映降水的强度和分布情况。

地形数据采用 ASTER GDEM V2 全球数字高程数据,空间分辨率达 30 m,由日本 METI 和美国 NASA 联合研制,于 2015 年 1 月 6 日免费面向公众分发,数据由地理空间数据云(www.gscloud.cn)提供下载;土地利用数据采用欧洲空间局(ESA,http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php)2009 年全球陆地覆盖数据集,分辨率为 300 m,在 ArcGIS 平台上通过最邻近法插值到与 DEM 相一致的 30 m。按照张洪江等^[21]的试验结果,由土地利用类型得到流域 Manning 水力糙度系数。

2.3 Floodarea 模型

Floodarea 是德国 Geomer 公司开发的水文动力学洪水淹没模型,内嵌于 ArcGIS 平台,被广泛应用

于洪水演进模拟、洪水动态风险评估等,国内的应用表明了其在不同地区山洪淹没模拟的适用性^[11-18]。Floodarea 洪水过程同时考虑栅格周围八个单元,水流量由 Manning-Stricker 公式计算,坡度由单元最低水位和最高高程差异决定,对每个单元都进行计算^[22],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;水流方向栅格间坡度决定。Floodarea 每个时相运行过程的相应淹没范围和水深都以栅格形式存储,直观地呈现洪水演进动态过程。

3 结果分析

3.1 山洪灾害淹没过程模拟

图 1 给出了 Floodarea 模拟的 2015 年 8 月 19 日 08 时至 20 日 08 时(北京时,下同)暴雨过程钢便桥附近的淹没过程,同时给出了距山洪暴发区域最近的林芝自动气象站的逐小时降水监测数据。降水过程具有显著的日变化特征^[23],早晨降水较弱;随着地面增暖加强,地面加热形成对流,午后 14 时降水强度开始增大,到 18 时降水强度最大,达到 10.1 mm/h;较强降水持续到夜间 20 时,随后开始减弱;凌晨 04 时

又开始形成较弱的降水。钢便桥的高度约为 2 m 左右,根据调查钢便桥约在 19 时 40 分垮塌,此时模拟深度达 2.5 m 左右,没过钢便桥约 0.5 m,较降水峰值滞后 2 h 左右。模拟的淹没水深较降水强度有所滞后,在 20 日 0 时达到最大,接近 3 m,这较降水峰值滞后达 5 h 左右,较强降水时段滞后约 4 h,这可能与流域集水过程有关,经过进一步检查降水区域分布情况,发现在流域上游地区的自动站监测得到在 20—23 时上游有较强的降水,这综合形成了淹没深度的峰值;随着降水的减弱,淹没深度逐渐减小,到 20 日 04 时的降水后淹没深度稍有回升。从山洪淹没过程的模拟来看,Floodarea 很好地反映了降水强度和分布的影响,与灾情调查的结果吻合较好。

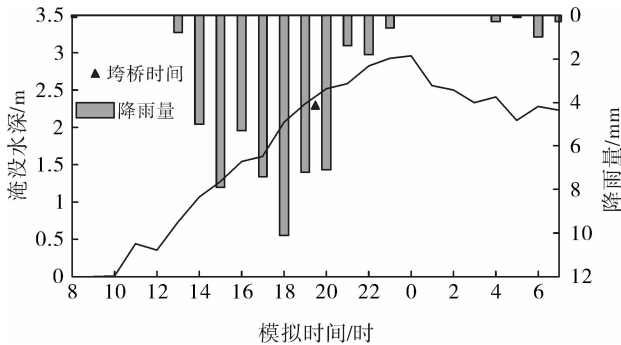


图 1 林芝巴宜流域永久河钢便桥逐时淹没水深模拟结果

3.2 灾害调查与模拟对比

对山洪暴发区最大淹没水深的调查结果与 Floodarea 模拟结果进行对比,图 2 给出所有调查点的对比结果。模拟结果与实地调查得到的最大水深误差在 -0.2~2.9 m 之间,其中 5 个调查点的模拟结果误差小于 0.2 m,8 个调查点模拟结果误差小于 0.5 m;2 个调查点的误差大于 1 m;大部分的模拟结果的淹没深度大于调查结果,河床上的模拟结果较差,偏高幅度最大。

总体而言,Floodarea 的模拟结果效果较好地反映了此次山洪过程的影响,淹没范围与实际发生山洪灾害分布基本一致,准确地反映了地势低地区的永久村、桥梁公路与其相邻的涅罗帮嘎村的淹没差异情况,表明在精细的地理信息基础上,Floodarea 可以较准确地反映洪水在地势低洼区积水汇集和水流演进的过程。

3.3 降雨量—淹没深度关系和临界雨量

综合考虑流域山洪灾害影响的区域和模拟结果,地形、海拔高度、与河沟的距离远近,居民聚居点、公路、桥梁等设施和社会影响等因素,选取钢便桥、柏油公路和永河村 3 个地点为预警(山洪隐患)点,通过逐

步增加面雨量的方式动态调整降水情景,分别模拟不同面雨量下的淹没深度和淹没水深;当隐患点的淹没水深达到山洪灾害等级时,即可得出预警点的山洪致灾临界雨量。

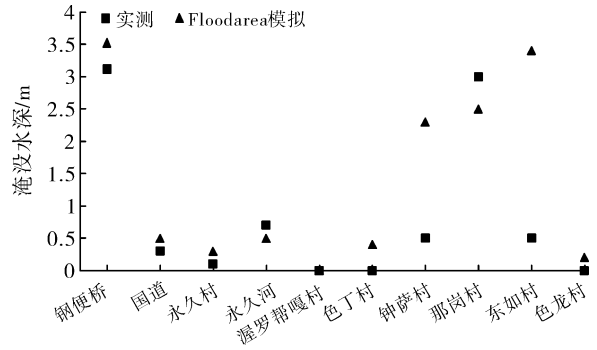


图 2 山洪灾害调查点淹没水深模拟与观测对比

根据西藏东南部地区短时强降水的特征,以 6 h 为模拟时间长度,模拟降水时间步长为 1 h,按照 6 h 累积雨量 10~100 mm 的降水强度分别进行模拟,以 5 mm 的增量逐渐调整降水强度,得到不同设定雨量强度下的淹没模拟结果,并提取预警点的最大淹没水深。图 3 给出得到的 3 个预警点的淹没水深和降雨量的关系,淹没水深随降雨量增加而增大,但两者并不成线性关系,淹没深度在降雨量较小时一直保持较低的淹没深度,当 6 h 降雨量达到 40~55 mm 以上时,淹没深度随降雨量增加开始呈现线性增加趋势;淹没深度与降雨量的这种关系与日常业务中对山洪的认识是一致的,与山洪暴发的集水过程、地形和上游地面产流过程有关,这种降雨量—淹没深度关系的非线性特征也是山洪多由短时强降水造成的原因。

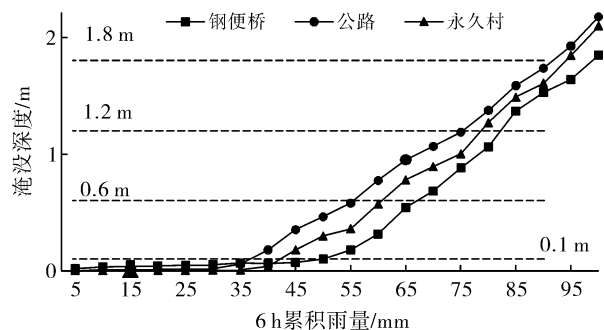


图 3 林芝巴宜区永久河流域降雨量—淹没深度关系

根据预警点得到的降雨量—淹没水深关系,当预警点的淹没水深分别达到 0.1,0.6,1.2 和 1.8 m 时,其对应的雨量即为该预警点的 1,2,3 和 4 级山洪灾害致灾临界雨量(表 2)。

3.4 临界雨量山洪淹没模拟

以地势较低、受灾影响较大的柏油公路得到的致灾临界雨量作为流域山洪致灾临界雨量,把 1—4 级山洪临界雨量输入 Floodarea 模型作为驱动雨量,计算得到不同山洪灾害等级临界雨量对应的淹没范围和深度。随着临界雨量的增大,洪水泛滥的范围扩大,淹没水深增大,在业务中,结合精细化分布的居民

点和交通数据与淹没栅格数据相叠加,能够直观地了解山洪灾害的影响程度。以图形和栅格数据的方式提供给流域地区气象部门,根据气象观测数据和降水预报可得到流域山洪精细化预警。本研究还以相同的方法得到了流域 4 级山洪临界雨量的 1, 3, 12 和 24 h 累积降雨量及其对应淹没栅格数据,为不同时段山洪预警提供参考。

表 2 林芝巴宜永久河流域山洪临界雨量阈值

山洪灾害等级	淹没深度/ m	山洪灾害影响	临界雨量/(mm·h ⁻¹)		
			钢便桥	永久村	公路
1	0.1	积水对生活有一定影响	49.6	40.7	33.0
2	0.6	洪水漫过汽车发动机,严重影响交通,受影响路段应暂时中止通行	67.2	60.1	55.7
3	1.2	洪水淹没大部分设施和农作物,影响区居民应当撤离	82.3	79.2	75.4
4	1.8	洪水严重危害生命财产安全,影响区居民必须撤离	100.0	94.4	91.9

4 讨论与结论

(1) Floodarea 水动力模型可以较好地模拟西藏复杂地形地区的山洪淹没过程,与灾害普查的山洪影响范围和淹没深度较为一致,在无水文观测资料的山区小流域山洪分析具有较高应用价值;

(2) 通过逐步增加面雨量值得方法,以模拟不同强度雨量情景,可用于确定山洪不同淹没水深的雨量,建立降雨量—淹没水深关系,进而推算不同山洪灾害等级的致灾临界雨量;利用这个方法确定了 3 个山洪预警点的临界雨量;

(3) 林芝巴宜区永久河山洪沟的 0.1, 0.6, 1.2, 1.8 m 淹没高度灾害等级的 6 h 临界雨量分别为 33, 55.7, 75.4 和 91.9 mm。

从实地考察和卫星图片上可以发现研究流域地区有多条泥石流沟,灾情报告也强调了山洪诱发的泥石流灾害,山洪和泥石流灾害共同作用加大了山洪研究的难度;由于山洪的暴发过程较快,汇水和集水的过程时间短,Floodarea 模型并未考虑水流的下渗问题,山洪临界雨量计算时没有考虑前期降雨和土壤含水状况;在利用 Floodarea 进行淹没模拟过程中发现,普查的 GPS 数据和海拔高度与 DEM 模型有一定的差异,这些因素都可能给淹没模拟带来一定的误差,这是在服务中利用淹没区域模拟结果需要加以注意的。在没有山洪淹没过程的准确资料情况下,采用多地点考察最大淹没深度的方式进行验证,可为西藏地区这样幅员辽阔、人口稀少,山洪灾害过程记录匮乏的地区提供一种可行的灾害普查方法和途径;还需要再加强山洪灾害风险普查工作,为西藏山洪分析和预警工作的开展提供更详尽、准确的基础资料,改善

水文模型的率定效果和验证;西藏地区的气象观测站点稀疏,山洪过程集水范围较小,在业务应用中需要综合多种资料得到尽可能精细的降水分布和面雨量以更准确评估山洪灾害的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 刘少军,张京红,张明洁,等.海南岛山洪灾害风险区划研究[J].水土保持研究,2013,20(5):165-169.
- [2] 周忠发,李波,邹长慧.望谟县特大山洪泥石流灾后重建分区与功能定位[J].水土保持通报,2013,33(1):174-177.
- [3] 王凯博,高保玲,李洪滨,等.博州山洪灾害防治对策探讨[J].水土保持研究,2007,14(1):289-294.
- [4] 钟祥浩,刘淑珍,王小丹,等.西藏高原生态安全研究[J].山地学报,2010,28(1):1-10.
- [5] 刘光轩.中国气象灾害大典:西藏卷[M].北京:气象出版社,2008.
- [6] 林志强,德庆,文胜军,等.西藏高原汛期大到暴雨的时空分布和环流特征[J].暴雨灾害,2014,33(1):73-79.
- [7] 叶金印,李致家,刘静,等.山洪灾害气象风险预警指标确定方法研究[J].暴雨灾害,2016,35(1):25-30.
- [8] 苏布达,姜彤,郭业友,等.基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及其应用[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):370-374.
- [9] 葛小平,许有鹏,张琪,等. GIS 支持下的洪水淹没范围模拟[J].水科学进展,2002,13(2):456-460.
- [10] 林志强,洪健昌,尼玛吉,等.基于 HBV 模型的尼洋曲流域洪水致灾临界面雨量研究[J].水土保持通报,2016,36(4):22-26.
- [11] 张明达,李蒙,戴丛蕊,等.基于 FloodArea 模型的云南山洪淹没模拟研究[J].灾害学,2016,31(1):78-89.
- [12] 姬兴杰,李凤秀,朱业玉,等.河南省洛河上游暴雨山洪致灾临界面雨量的确定[J].气象与环境学报,2015,31(6):43-50.

(下转第 195 页)

但存在着系统误差,这将增加未来降水预估的不确定性。考虑到模式的可靠性和排放情景的合理性,本文对 MRI-CGCM3 模式进行相对误差的修正,以实测站点数据对修正数据进行验证,不仅保留空间相关系数较高的优点,而且明显的减小了相对误差,提高了降水预测研究的可信度。今后仍需要开展更多误差修正工作和多模式单独模拟与集成模拟的分析工作,以进一步减少模拟结果的误差和不确定性。

致谢:感谢中山大学肖明忠博士提供的气候情景数据,感谢国家气候中心高学杰老师、CMIP 耦合模式比较工程的 Torsten Rathmann 给予的帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 姜彤,苏布达,王艳君,等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展,2005,1(2):65-68.
- [2] 富元海. CMIP3 模式预估的 21 世纪东亚夏季降水年际变率变化过程[J]. 中国科学:地球科学,2012,42(12):1937-1950.
- [3] 王国庆,张建云,李岩,等. 海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J]. 资源科学,2014,36(5):1043-1050.
- [4] 吴晶,罗毅,李佳,等. CMIP5 模式对中国西北干旱区模拟能力评价[J]. 干旱区地理,2014,37(3):499-508.
- [5] Xu Ying, Xu Chonghai, Gao Xuejie, et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River basin of China in the 21st century[J]. Quaternary International, 2009,208(1):44-52.
- [6] Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble (Part1): Model evaluation in the present climate[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(4):1-18.
- [7] 姜大膀,富元海. 2 °C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估[J]. 大气科学,2012,36(2):234-246.
- [8] 江志红,陈威霖,宋洁,等. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估[J]. 大气科学,2009,33(1):109-120.
- [9] 陈晓晨,徐影,许崇海,等. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估[J]. 气候变化研究进展,2014,10(3):217-225.
- [10] Xie Pingping, Chen Mingyue, Yang Song, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia[J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(3):607-626.
- [11] Xu Ying, Xu Chonghai. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012,5(6):489-494.
- [12] 陈活泼. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估[J]. 科学通报,2013,58(8):743-752.
- [13] 彭俊台,张强,陈晓宏,等. 珠江流域极端降雨时空演变特征分析[J]. 灾害学,2011,26(4):24-28.
- [14] 韩乐琼,韩哲,李双林. 不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J]. 大气科学学报,2014,37(5):529-540.
- [13] 张磊,王文,文明章,等. 基于 FloodArea 模型的山洪灾害精细化预警方法研究[J]. 复旦学报:自然科学版,2015,54(3):282-287.
- [14] 谢五三,田红,卢燕子. 基于 FloodArea 模型的大通河流域暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 暴雨灾害,2015,34(4):384-387.
- [15] 姜智怀,张毅之,蔡哲,等. 基于河道栅格的山洪灾害淹没模拟[J]. 气象,2014,40(8):1013-1018.
- [16] 文明章,林昕,游立军,等. 山洪灾害风险雨量评估方法研究[J]. 气象,2013,39(10):1325-1330.
- [17] 叶丽梅,周月华,李兰,等. 通城县一次暴雨洪涝淹没个例的模拟与检验[J]. 气象,2013,39(6):699-703.
- [18] 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.
- [19] 胡桂胜,陈宁生,邓虎. 基于 GIS 的西藏林芝地区泥石流易发与危险区分析[J]. 水土保持研究,2012,19(3):195-199.
- [20] 林志强,唐叔乙,何晓红,等. 西藏高原汛期水汽输送特征与降水异常[J]. 气象,2011,37(8):984-990.
- [21] 张洪江,北原曜,谢明曙,等. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究[J]. 北京林业大学学报,1994,16(4):86-92.
- [22] Geomer. Floodarea and Floodarea HPC: ArcGIS-extension for calculating flooded areas: User Manual V10.0 [M/OL]. Heidelberg: Geomer GmbH, 2011 [2016-05-01]. http://www.geomer.de/fileadmin/templates/main/res/downloads/floodarea10_manual_englisch.pdf
- [23] 林志强,假拉,罗骝翮,等. 西藏高原闪电特性时空分布特征[J]. 气象科技,2012,40(6):1002-1006.

(上接第 187 页)