

张容焱,游立军,高建芸,等. 2013. 统计方法与淹没模型结合的山洪灾害风险评估方法及其应用. 气象, 39(12):1642-1648.

统计方法与淹没模型结合的山洪灾害 风险评估方法及其应用^{*}

张容焱 游立军 高建芸 林 昕 唐振飞

福建省气候中心,福州 350001

提 要: 本文针对有水位资料,但没有流量观测的流域,同时又有历史罕见洪水记载、流域断面洪水警戒水位和自动站记载的近年几次小洪水过程,采用统计分析方法确定雨-洪关系,得到致灾临界雨量;再应用淹没模型模拟洪水淹没情况,得到洪水的风险等级评估。通过对历史特大山洪个例的淹没反演,可以看到由数理统计与淹没模型相结合的方法确定出的山洪风险等级,与实际情况基本相符。由于洪水记载和考察资料,往往对洪水淹没的高度记录准确,而对发生的具体时间通常是模糊的,本文得到的临界雨量指标是否能够预见洪水需要实例检验。通过 2012 年前汛期强降水过程的检验,虽然预警了低风险洪水事件,但是风险发生时间有差异,经过合理调整低风险临界雨量,满足了能够预见洪水的目的。对于其他等级的临界雨量的检验,有待于日后更多的实例,进行合理的调整,逐步完善翠江流域的山洪临界雨量指标。

关键词: 山洪, 临界雨量, 雨-洪关系, 淹没模型

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 12. 013

Flash Floods Disaster Risk Assessment Method Combination of Statistical and Inundated Model and Its Application

ZHANG Rongyan YOU Lijun GAO Jianyun LIN Xin TANG Zhenfei

Fujian Climate Center, Fuzhou 350001

Abstract: This paper focuses on critical hazard rainfall of valleys that only has water level records but no water flow records. After statistically analysing the water stage data and the rainfall data during floods of recent years, this paper gets the relationship between rainfall and floods. With this relationship and water level records of historical floods, the critical hazard rainfall of valleys is obtained. Furthermore, this paper estimates the risk levels of each critical rainfall by simulating submergence with submergence model. By contrasting the simulated result to history records of some serious floods, the rainfall threshold got from statistic is proved to be reasonable. Due to the clear submerging depth and blurry occurrence time of flood records, the rainfall threshold obtained still needs to be verified. Although the occurring time of the estimated hazards disaccords with reality, the low-level risk rainfall threshold got verified in rainy season of 2012. It can be used to predict a low-risk rainfall flood by lowering the risk critical rainfall reasonably. For other levels of risk rainfall, verification is very necessary once new flood examples are collected.

Key words: flash floods, rainfall threshold value, rainfall-flood relationship, flood model

^{*} 中国气象局应急减灾与公共服务司《气象灾害风险评估业务试点》项目和福建省气象科学研究课题《福建省暴雨山洪灾害风险评估》共同资助

2012 年 9 月 25 日收稿; 2013 年 6 月 21 日收修定稿

第一作者:张容焱,主要从事气候分析与应用. Email:fzzry@163.com

引 言

突发山洪是山洪沟集水面积上短历时强降雨大大超过其出水量而产生的地表径流,具有突发性强、暴涨暴落的特点,往往发生在山地谷沟或河道,从而汇集成洪流汹涌而下。山丘区小流域因流域面积和河道的调蓄能力小,坡降较陡,洪水持续时间短(历时几小时到十几小时,很少能达到一天),但涨幅大,洪峰高,洪水过程线多呈尖瘦峰型(章国材,2010)。山洪及其诱发的泥石流、滑坡常造成人员伤亡,毁坏房屋、田地、道路和桥梁等,甚至可能导致水坝、山塘溃决,对国民经济和人民生命财产造成严重危害。近年来,世界各地大范围的异常气候事件频繁发生,我国华南地区 20 世纪 90 年代初期至今降水比常年偏多(李聪等,2012),山洪地质灾害频发,对社会经济可持续性发展具有潜在威胁,各级政府部门已将应对自然灾害的防御能力建设提到日程,这对山洪灾害风险评估提出了迫切的服务需求。

酿成洪灾的因素是多方面的,一类是降雨因素,另一类是下垫面因素。降雨因素与气象条件有关,其中降水特性,包括过程降水总量、降雨历时及降雨强度,是致灾的主导因素;下垫面因素包括地质、地貌、植被等环境条件以及人类活动的间接因素(范世香等,2008;廖玉芳等,1999;张亚萍等,2013)。因此,山洪灾害风险评估中,降雨因素是关键因素,其中流域面内的致灾临界雨量的分析计算与确定是规避山洪灾害的重要基础(赵琳娜等,2010)。目前对于临界(面)雨量的计算方法有很多尝试,如应用“水位反推法”(叶勇等,2008)、泰森面雨量法(王忠红等,2010;王志等,2010)、高斯权重客观分析法(陈晓弟等,2010)来确定小流域的临界雨量,还有用 1 h 或几小时降雨量达到或超过某一临界雨量为指标,综合考虑累计降雨量与降雨强度双指标的临界雨量(杨善恭等,1999)等,这些方法需要一定数量和范围的水文和雨量资料。而多数小流域水文、雨量资料缺乏,即便有资料也不易获取,常规气象站主要分布在县(市),对于山洪而言缺乏代表性,而区域自动站观测时间尚短,无法在有限的年份内观测到罕见山洪,更多的是小山洪过程,代表性不够。

流域水文模型是基于数学物理和水文学理论,对自然界中复杂的水文现象作近似的模拟。流域水文模型很多,其中“TOPMODEL”模型由于结构简

单、优选参数少、物理概念明确而得到广泛的应用;国内最著名的是新安江水文模型等。这些模型已在防灾减灾,政府决策服务中起着至关重要的作用。

福建属于亚热带季风气候区,每年 5—6 月前汛期暴雨期间,季风雨带徘徊在江南、华南一带,时常发生持续性暴雨和大暴雨过程,在复杂地形的作用下,极易突发历史罕见洪涝灾害(赵琳娜等,2012)。本文探讨前汛期暴雨期间,针对有水位但没有流量的水文记录,有历史罕见洪水记载、流域断面洪水警戒水位和自动站记载的近年几次洪水过程,尝试应用统计学和淹没模型相结合的方法,寻找山洪沟小流域发生洪水灾害的预警临界(面)雨量指标,采用 FloodArea 淹没模型模拟洪水过程,根据定量降水预报和临界(面)雨量指标,获得承灾体的预见风险,达到防灾减灾的目的。

1 方法简介

1.1 泰森多边形法计算面雨量

根据研究流域的数字高程地图(DEM),利用 ArcGIS 软件生成河流水系及各河流流域文件,截取所要分析河流的流域,再根据流域范围内及周围的雨量站点,利用 ArcGIS 制作流域所在区域的泰森多边形,最后采用权重法,即:

$$AR = \sum_{i=1}^n R_i \cdot A_i / A$$

式中,AR 为流域面雨量, R_i 为站点 i 的雨量, A_i 为在站点 i 代表的面积, A 为流域总面积, n 为泰森多边形个数。

1.2 统计学方法的应用

根据实测雨量和水位资料,采用相关分析和皮尔逊Ⅲ(马开玉等,1993)统计学方法,得到流域雨-洪关系和洪水重现期,结合历史特大洪水记载,便可确定流域致洪临界雨量。

1.3 “FloodArea”淹没模型计算原理

“FloodArea”洪水淹没模型,是德国 Geomer 公司开发的基于 GIS 栅格数据构建二维不恒定流洪水演进模型完成的水动力模型,它不同于静态洪水风险区划图,在每个模拟运行时间里,相应淹没范围和水深都以栅格形式呈现和存储,直观明了,易于查

询(苏布达等,2005;文明章等,2013)。

淹没模拟过程中,水流对邻近栅格单元的泻入速度通过曼宁公式计算(Geomer,2003),公式如下:

$$V = k_{st} \cdot r_{hy}^{2/3} \cdot I^{1/2}$$

式中, V 为水的流速; k_{st} 为水力糙度; r_{hy} 为水力半径,即流体截面积与湿周的比值,湿周指流体与边壁接触的周长,不包括与空气接触的部分; I 为地形坡度。

水流的淹没深度为淹没水位高程和地面高程之间差值,由下式表示(Geomer,2003):

$$flow_depth = water_level_a - elevation_a$$

淹没过程中的水流方向由地形坡向所决定,地形坡向反映了斜坡所面对的方向,坡向指地面上一点的切平面的法线矢量在水平面的投影与过该点的正北方向的夹角。对地面任何一点来说,坡向表征了该点高程值改变量的最大变化方向。计算公式如下(Geomer,2003):

$$aspect = 270 - \frac{180}{\pi} \cdot \alpha \tan 2 \left[\frac{\partial Z}{\partial Y} + \frac{\partial Z}{\partial X} \right]$$

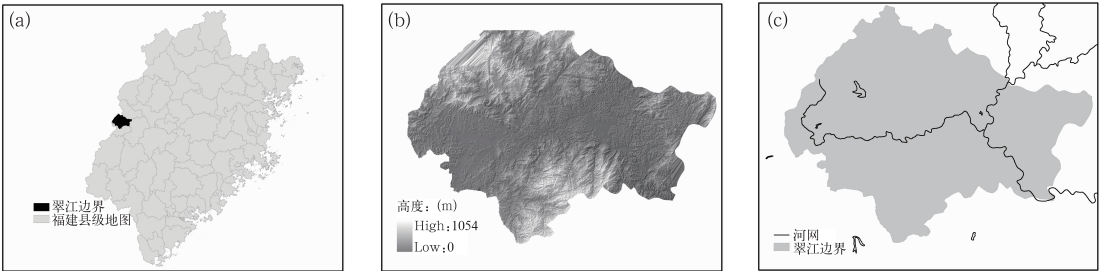


图 1 翠江流域地理位置图(a),翠江流域高程图(b)和翠江流域分布图(c)

Fig. 1 Geographical location (a), digital elevation map (b), distribution graph (c) of Cuijiang River Basin

2.2 资料

宁化翠江流域收集到观测的较大降水过程有 10 个,包括雨量和水位资料;区域自动站降水资料很短,只收集到 2010 年 5 和 6 月的 2 个过程,且这 2 个过程的洪水都不是历史最严重过程。

2.2.1 水位资料

翠江流域唯一的宁化水文观测站,观测逐日水位,根据 2002 年以来的暴雨过程时间,选取 2002 年 6 月 11—19 日、2005 年 5 月 3—6 日、2005 年 5 月 11—15 日、2005 年 5 月 25—27 日、2005 年 6 月 15—24 日、2006 年 5 月 16—19 日、2006 年 5 月 30 日至 6 月 8 日、2006 年 6 月 13—18 日、2010 年 5 月

19—23 日、2010 年 6 月 13—27 日 10 个过程的水位资料(图 2),其中 2010 年 6 月 16 日 18 时至 18 日 10 时缺测时段较长。

2.2.2 雨量资料

选取与水位资料同步的宁化气象站降水资料(图 2),无缺测。

2.2.3 面雨量资料

面雨量的计算采用泰森多边形法(图 3)。

选取与水位资料同步的自动站和水文雨量站降水资料,通过泰森多边形法获得翠江流域的面雨量资料,仅有 2010 年 5 月 19—23 日和 2010 年 6 月 13—27 日 2 个过程。

2 实例分析

2.1 山洪流域基本情况

宁化翠江流域位于福建省三明市宁化县境内(图 1a),流域沿河谷分布,地势两边高中间低(图 1b),海拔高度 337~946 m,总面积 310.9 km²。流域上游有东溪和西溪两条支流,在宁化县城南部交汇形成翠江,呈自西北—东南走向,流经翠江的乡镇有翠江和城南(图 1c)。

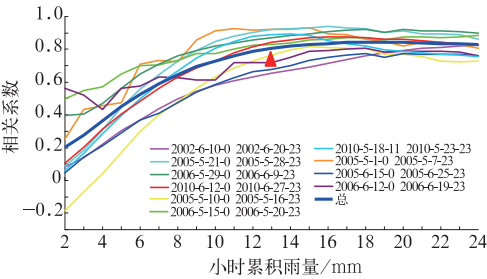


图 5 宁化水文站水位和宁化雨量相关分析

Fig. 5 Correlativity between water level of
Ninhua Hydrometric Station and
precipitation of Ninhua Weather Station

合雨洪关系是不全面的,加入 1994 年最大水位后,宁化水位和 13 h 累计雨量之间可以用线性关系(图 6 中直线)拟合,其方程表示如下:

$$Y = 0.0381X + 311.59 \quad (2)$$

式中,Y 表示水位,X 表示宁化气象站 13 h 累计雨量,利用此式可以互算临界雨量和水位。

2.4 致灾临界雨量和水位的确定

根据 13 h 累计雨量,通过概率论估算各种重现期,再依据历史记载洪水水位和评价,求算对应的可能 13 h 累计雨量,以及实测过程最大 13 h 累计雨量,划分致灾临界水位和雨量。

2.4.1 水位重现期估算

由于缺乏水位资料,无法直接得到多年一遇的洪水水位,但是从其他途径获得了水文局关于宁化

水文站水位重现期数据(表 1),利用皮尔逊Ⅲ概率统计法(马开玉,1993),分析宁化 13 h 实测累计雨量,以水文局水位重现期为基础,利用雨洪关系式 2,调整参数(图略),使雨量推算的重现期水位与收集的重现期水位相差最小(表 1)。对比表 1 估算水位设计值(3 列)和水文站水位重现期值(4 列),两者的差值列于第 5 列,差异不大,可以认为估算是合理的。

2.4.2 临界水位和雨量

宁化翠江流域宁化站警戒水位为 314.65 m,危险水位为 316.15 m,水位差 1.5 m,警戒水位和危险水位对应的 13 h 临界雨量分别为 80.3 和 119.7 mm。

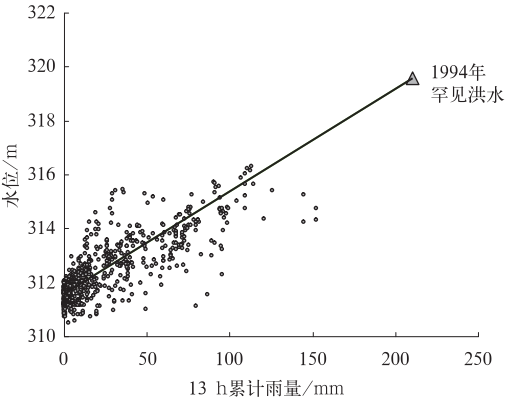


图 6 宁化水文站水位和 13 h 累计
雨量的统计关系

Fig. 6 Scatter diagram about water level
of Ninhua Hydrometric Station and 13 h
accumulative precipitation

表 1 基于 13 h 累计雨量计算的多年一遇水位设计值

Table 1 Water level recurrence interval design value based on 13 h accumulative precipitation

重现期/a	13 h 累积降水 设计值/mm	估算水位 设计值/m	宁化水文站 水位重现值/m	估算水位与水文站 水位重现值差/m	PⅢ 参数
100	212.54	319.69	319.55	0.14	变差系数 $Cv=0.4$ 偏态系数 $Cs=0.99$ 倍比系数 $Cs/Cv=2.48$
50	194.12	318.99	319.16	-0.17	
30	180.09	318.45			
20	168.60	318.01	318.06	-0.05	
10	148.00	317.23	317.07	0.16	
5	125.60	316.38	316.32	0.06	
2	90.70	315.05			

根据历史记载的若干洪水水位,按照式(2)反演成雨量(图 7),超过 50 年一遇的洪水有 2 年,其中 1994 年接近于百年一遇;10~50 年一遇的有 5 年,其中有 3 年是解放以前的记录;2~10 年一遇的有 4 年,按此划分 13 h 累积雨量的临界值见表 2,近年来各洪水过程实测雨量和水位所在的区间,正好吻合

其记载的洪水等级,认为临界雨量的划分是合理的。

2.5 “FloodArea”模型应用

通过以上分析,我们得到了翠江流域 1994 年特大洪水过程的估算水位和各等级致灾临界水位,采用河道网络漫顶式模式可以反演历史洪水过程和各

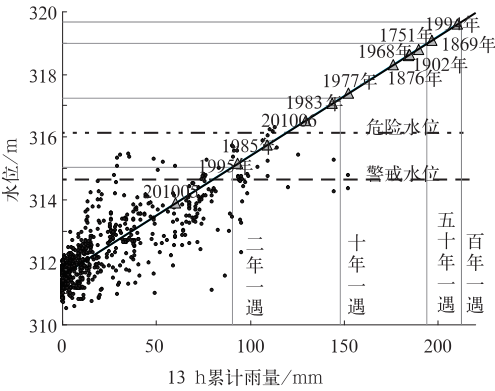


图 7 宁化历史洪水记录的重现期
Fig. 7 Recurrence interval of Ninghua historical floods

风险等级的淹没范围。

2.5.1 “1994.5”特大洪水淹没过程重现

据记载,1994 年 5 月 1—3 日,沙溪流域骤降暴雨,上游宁化县在 40 h 内降雨量达 366 mm,突破了有水文记录以来的历史最高纪录,发生了百年罕见特大洪水灾害,宁化水文站测得洪水水位 319.60 m,水深约 14 m,超警戒水位 4.95 m,超危险水位 3.45 m。全城淹没,水深约 2~4 m,全县经济损失 14 亿元,城区停水停电,城内主要交通桥梁和寿宁桥、东门桥和通往郊区邻县的公路全部被淹,与外界交通中断。

经 FloodArea 淹没模型反演洪水淹没过程(图略),出现 9 m 水深(大致的危险水位)的时间是 2 日

表 2 宁化洪涝灾害 13 h 累积雨量临界值
Table 2 Critical value of 13 h accumulative precipitation of flood disaster in Ninghua

致灾等级	13 h 累积雨量/mm	对应水位/m	超警戒水位/m	超危险水位/m	重现期/a	实例
严重 (特大洪水)	≥194.12	≥318.99	4.34	2.84	≥50	1869、19940502
中等 (大洪水)	148.00~194.12	317.23~318.99	2.58	1.08	10~49	1751、1876、1902、 19680618、19770620
较轻 (一般洪水)	90.7~148.00	315.05~317.23	0.4		3~9	19830531、19850528、 19950603、20100618
无 (无洪水)	<90.7	<315.05			≤2	20100523

* 19940502 表示 1994 年 5 月 2 日。

01:00,洪水发展很快,09:00 整个流域水深超过 10 m(大致的警戒水位),之后整个流域的水位继续上涨,至 3 日 02:00 城区的水位下降,洪峰移至下游。实测逐时雨量表明,强降水发生在 1 日的 21 时至 2 日的 20 时,2 日 22 时降水开始减弱,降水累积过程和洪水发展过程、最高水位和淹没区域与实际基本吻合。

2.5.2 临界致灾水位淹没状况

根据宁化水文站断面临界水位,经 FloodArea 淹没模型模拟了高、中、低风险水位的淹没深度(图略),得到严重、中等、较轻等级水位对应的淹没范围见表 3,可根据精细化降水预报,预估未来水位高度,发布可能淹没村庄的承灾体风险评估报告。

2.6 检验

各风险等级水位是按重现期水位确定的,低风险上限对应 10 年一遇,中风险上限对应 50 年一遇,

高风险对应超过 50 年一遇的水位,再根据雨-洪关系得到对应的临界雨量,确切的雨量指标是否合理需要实时洪水过程的检验。

2011 年翠江流域未发生强降水事件,无法得到检验,仅在 2012 年 5 月 13—19 日雨季第二场持续性暴雨过程中,13 日 09—17 时宁化翠江流域发生超过警戒水位(314.65 m)的洪水。按照上述获得的临界雨量,山洪灾害监测预警系统于 13 日 13—17 时发出低风险预警信号,预警时间比实际超出警戒水位的时间迟 4 h,表明低风险等级临界雨量指标存在不合理现象,临界雨量指标偏高。由图 8 可见,自 13 日 08 时起,13 h 累计雨量出现大幅上升的跳跃后趋于平稳,至 17 时后急剧下降。在低风险水位(315.05 m)不更改的情况下,微调临界雨量的大小,将低风险临界雨量 90.7 mm 下调至 84 mm,结果是 13 h 累计雨量出现低风险等级的起始时间比水位超低风险水位的时间提早 2 h;洪水回落到低

表 3 各风险等级淹没面积和村庄

Table 3 Inundated area and submerged villages under different risk grades

风险等级	水位/m	淹没面积 /km ²	描述	淹没村庄
3 级	≥318.99	13.0	重 (淹没居民点)	淹没红卫村、城郊乡、中山村、翠江镇、双虹村、宁化、宁化造纸厂、窑上、铜锣丘、何家园、城南乡、班竹、麦墩、伍家坊、鱼龙村、乌龙峡电站、江下、宁化县合成氨厂、钢厂下、东溪电站、下石、高埕村
2 级	317.23~318.99	10.5	中(淹没农田 和居民点)	淹没红卫村、城郊乡、中山村、翠江镇、双虹村、宁化、宁化造纸厂、铜锣丘、班竹、麦墩、伍家坊、鱼龙村、乌龙峡电站、江下、东溪电站
1 级	315.05~317.23	6.9	轻(漫堤)	淹没红卫村、城郊乡、中山村、翠江镇、宁化造纸厂、铜锣丘、伍家坊、乌龙峡电站

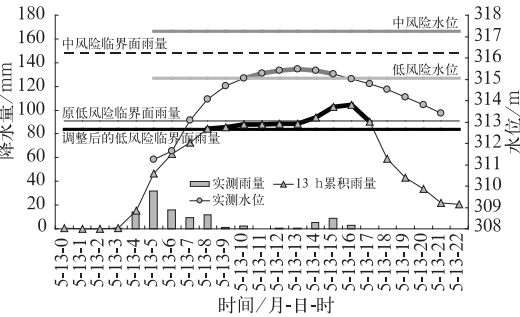


图 8 山洪临界雨量指标 2012 年雨季检验

Fig. 8 Verification of critical precipitation of torrential flood in 2012 rainy season

风险水位后,13 h 累计雨量仍未解除低风险预警,推迟 1 h 后才解除。调整后的低风险临界雨量指标能够预见洪水,认为是可行的指标。

3 结 论

本文尝试了针对有水位资料,但没有流量观测的小流域,可应用长期的逐时雨量资料和水位资料,采用统计分析方法确定雨-洪关系,从而得到致灾临界雨量;再应用淹没模型模拟洪水淹没情况,得到洪水的风险等级评估。通过对历史特大山洪个例的淹没反演,可以看到由数理统计与淹没模型相结合的方法确定出的山洪风险等级,与实际情况基本相符。但是,临界雨量和水位上涨至临界值的时间是否对应,没有记载可以验证。

从 2012 年实际应用效果检验看,预警了洪水事件的发生,但是细化到具体发生时间时有很大的出入,这是因为建模的洪水信息不够全面。本文检验个例为低风险等级,经过合理的调整,满足了能够预见洪水的目的,对于其他等级的临界雨量有待于日

后更多的实例,进行合理的调整,逐步完善翠江流域的山洪临界雨量指标。

参考文献

陈晓弟,罗京义,谢仁波,等. 2010. 铜仁锦江河流域面雨量计算方法探讨. 贵州气象(增刊):134-137.

范世香,程银才,高雁. 2008. 洪水设计与防治. 北京:化学工业出版社,241.

李聪,肖子牛,张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征. 气象,38(4):419-424.

廖玉芳,郭庆. 1999. 常德地区洪涝灾害加剧原因分析. 气象,25(1):55-56.

马开玉,丁裕国,屠其璞,等. 1993. 气候统计原理与方法. 北京:气象出版社,518.

苏布达,姜彤,郭业友,等. 2005. 基于 GIS 栅格数据的洪水风险动态模拟模型及应用. 河海大学学报,33(4):370-374.

王志,赵琳娜,张国平,等. 2010. 汶川地震灾区堰塞湖流域面雨量计算方法研究. 气象,36(6):7-12.

王忠红,赵贤产,余菲. 2010. 义乌降水气候分析中的面雨量计算及其应用比较. 浙江水利水电专科学校学报,22(1):47-50.

文明章,林昕,游立军,等. 2013. 山洪灾害风险雨量评估方法研究. 气象,39(10):1325-1330.

杨善恭,邱晓光,赵水芝,等. 1999. “98. 6”闽北罕见持续性暴雨的环境特征和预报. 气象,25(2):40-44.

叶勇,王振宇,范波芹. 2008. 浙江省小流域山洪灾害临界雨量确定方法分析. 水文,28(1):56-58.

章国材. 2010. 气象灾害风险评估与区划方法. 北京:气象出版社,177.

张亚萍,沃伟峰,刘德,等. 2013. 基于精细化降水分布的山洪气象条件分析. 气象,39(1):101-111.

赵琳娜,吴昊,田付友,等. 2010. 基于 TIGGE 资料的流域概率性降水预报评估. 气象,36(7):133-142.

赵琳娜,包红军,田付友,等. 2012. 水文气象研究进展. 气象,38(2):147-154.

Geomer. 2003. Floodarea-Arcview extension for calculating flooded areas (User manual Version 2. 4). Heidelberg.