

王莉萍,王秀荣,张立生,等,2018.一种区域降水过程综合强度评估方法的探索和应用[J].气象,44(11):1479-1488.

一种区域降水过程综合强度评估方法 的探索和应用*

王莉萍 王秀荣 张立生 张建忠 王维国

国家气象中心,北京 100081

提 要: 降水过程强度精细化定量评估是气象现代化业务服务的重要需求,也是暴雨灾害影响评估研究的关键环节。利用1961年以来国家气象站降水气象观测资料,以站点降水背景表征地域特征,通过定义单站和区域降水过程的起始和结束条件界定降水过程,提取了降水强度、持续时间、覆盖范围三个降水过程的评价指标,在深度挖掘降水空间和时间尺度信息基础上,计算三个降水过程的评价指标。然后,基于百分位分布和概率统计,对降水过程三个评价指标进行精细化指数划分,建立降水过程综合强度评估模型。最终将降水过程划分为极端、特强、强、较强、中等五个等级。文中应用案例对评估方法进行验证,结果显示对单站和区域降水过程综合强度等级评估方法合理,既能体现降水过程地域特征,又能表征降水过程的影响程度,方法具可操作性,能够直接应用于气象服务业务和暴雨灾害影响评估,也可为历史降水过程案例入库、灾情信息演变特征分析提供依据。

关键词: 降水过程,评估,指标,模型

中图分类号: P426,P468

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.011

Exploration and Application of Comprehensive Intensity Evaluation Method for Regional Precipitation Process

WANG Liping WANG Xiurong ZHANG Lisheng ZHANG Jianzhong WANG Weiguo

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: The refined quantitative evaluation of precipitation process intensity is one of the important requirements in the modernization of meteorological operational services and a key link in the rainstorm disaster impact assessment research. By using rainfall observation data from 2410 weather stations since 1961 and precipitation background at stations to represent the regional characteristics, the beginning and end conditions of a single station and regional precipitation process are defined, and three evaluation indexes of precipitation process are extracted, including rainfall intensity, duration and range. In addition, three evaluation indexes in the process of precipitation are calculated based on the spatio-temporal precipitation data. Then, based on percentile distribution and probability statistics, the three evaluation indexes of precipitation process are subdivided and the comprehensive intensity evaluation model of precipitation process is established. Finally, the intensities of precipitation process are divided into five grades including extreme, extra-severe, severe, heavy, medium grades. The results of validating the evaluation method show that single station and regional precipitation intensity grade evaluation method is reasonable. It can not only reflect geographical features, but also characterize the effect of the precipitation process. This method has strong

* 中国气象局决策气象服务专项和国家气象中心预报员专项(Y201720)共同资助

2017年2月14日收稿; 2018年8月24日收修定稿

第一作者:王莉萍,主要从事决策气象服务工作和灾害性天气预警评估技术研究. Email: wanglip@cma.gov.cn

the maneuverability, and can be directly applied to meteorological service operations and heavy rain impact assessment. It can also be used for the storage of historic precipitation process case, providing basis for the characteristics analysis of disaster information.

Key words: precipitation process, evaluation, index, model

引 言

在现代气象业务中,降水过程统计和强度评估是气象服务的重要工作,也是对外服务中表征雨水丰少的重要方法之一。陈艳秋等(2006)、李春梅等(2008)、裘祝香(2008)、裘祝香等(2009)、邵末兰等(2009)、郑国等(2011)、袁慧敏等(2012)、吴振玲等(2012)、石艳和李怀志(2012)、程肖侠等(2014)基于概率统计、主成分分析、欧式距离等方法,对某一个区域或单站暴雨过程进行快速评估。但我国降水时空特征明显、地域差异大,上述研究无法适用于全国任意区域,而国家级气象服务中经常需要对任意区域降水过程定量评价。王莉萍等(2015)研究了中国区降水过程综合强度评估方法,并将其作为致灾因子纳入暴雨灾害风险及影响评估方法和应用的研究;基于降水区划分,实现了中国范围内任意区域降水过程综合强度的快速定量评估和预评估,以客观方法实现对降水过程起始和结束时间的界定,打破了从天气系统划分降水过程和人工主观判断的传统理念,实现了降水过程提取自动化。但是随着大数据时代的到来,对降水区划分的理念已经不能满足气象现代化的需求,需要深度挖掘数据,由点到面实现对降水过程的精细化评价。王莉萍等(2015)曾经将中国划分为四类降水区,但划分较为粗略,不能很好表现各地降水的地域差异,且对降水过程评估指标的指数划分不够精细,对强度相当的过程辨别不明显。

为了给不断扩充的气象服务提供精细的降水过程综合强度定量评估和预评估信息,给防灾减灾方案制定提供决策参考,本文考虑降水的地域差异,以站点历史降水背景为基础,划分降水强度指数;增加小时降水信息,兼顾降水影响随时间的衰减,充实降水过程评估指标;细化评估指标指数划分,增加降水过程极端等级,改进区域降水过程强度的评估方法。最终,实现区域和单站降水过程前预评估、降水过程

中实时评估和降水过程后评估的精细化和定量化,实时支撑气象服务业务。

1 资 料

选取中央气象台目前正在使用的 2410 个国家气象站点(包括基准基本站 756 个,一般站 1654 个)资料,经过国家气象信息中心质量控制整编的 1951—2016 年国家气象观测站逐小时降水资料和 6 h 降水资料,其中 6 h 降水资料用于生成日降水量(当日 08 时至次日 08 时)资料。因各地建站时间不同,为了保证站点降水背景信息的完整性,日降水量百分位排序时使用是建站以来的观测数据。此外,由于站点信息越多,降水过程提取和评估越准确,为了确保观测数据的连续性且国家站站点达到 2000 个站以上,本文选取 1961 年以来降水过程用于统计分析和验证。

2 降水过程定义和评价指标计算

本文主要针对能对社会经济、环境、民生等造成一定影响的降水过程进行评估。定义降水过程的起始时间以天为时间单位,站点降水录入过程定为该站点日降水量达到历史日降水量从小到大排序百分位 90% 的对应值。站点有降水但未录入的过程为弱降水过程。

考虑到气象服务的需求和站点信息的不完整性,区域降水过程开始定义为达到录入门槛的站点数占评估区域内站点的比例 $\geq 5\%$ 或 ≥ 40 个站;降水过程结束定义为达到录入门槛的站点数占评估区域内站点的比例 $< 5\%$ 或 < 40 个站。

基于降水过程的定义,将降水强度、持续时间、覆盖范围三个因子作为区域降水过程的评估指标。

2.1 降水强度(R_p)和指数(R)

在降水过程中,过程累计雨量、日雨量和小时雨量等要素都会影响降水强度。本文首先要将三个描

述降水强度的要素统一到一个可比量纲上,统一为日降水强度。将累计雨量换算成过程平均日降水强度,日雨量提取过程最大值,小时雨量取过程最大小时降水量。利用最大小时降水量 R_h 和日降水量 R_{dv} 之间等效雨量转换关系(扈海波等,2013;张春山等,2004),将小时最大降水量等效成日雨量值:

$$R_{dv} = 4.216R_h \quad (1)$$

换算后最大小时降水量 R_h (单位:mm) 对应于日雨量 R_{dv} (单位:mm) 的值。

降水强度(R_p)可定义为单位时间单位面积上的降水体积。本文用单日单站的降水量表示,考虑降雨影响,通过平均日降水强度、日雨量最大值和最大小时雨强换算后雨量的加权平均得出,计算如下:

$$R_p = a \frac{\sum_{d=1}^m r_d}{m} + br_{\max} + cR_{dv}, a + b + c = 1 \quad (2)$$

式中, r_{\max} 为过程日雨量最大值, r_d 为过程逐日雨量观测值, R_{dv} 为小时雨量换算后的等效雨量值(单位:mm); a, b, c 为加权系数,在计算降水过程综合强度时作用同等重要,但不同地区根据重点致灾要素的不同可适当调整,本文均取 1/3。

利用 1951—2010 年国家气象观测站日降水资料,考虑张春山等(2004)、刘仁志和倪晋仁(2004)、李中等(2008)、王家祁和骆承政(2006)、赵健和范北林(2006)、刘国纬和沈国昌(2006)、张廷治等(1996)和柳源(1998)研究的暴雨山洪灾害的分布特征和引发山洪灾害的降水临界值以及王秀荣等(2016)、陈悦雨等(2016)、甘衍军等(2017)和杨辰等(2017)关于暴雨灾害风险的研究,将 2410 个观测站降水资料按从小到大排列,分别提取百分位数 90%、95%、97%、98%、99%、99.5%、99.7%、99.8%、99.9%、99.95%、100% 所对应的值,组成日降水强度矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad i = 2410, j = 11$$

在对降水强度指数划分(王莉萍等,2015)基础上,细化降水强度指数,考虑站点差异性,将日降水强度矩阵 R 指数划分,具体划分方法见表 1。

将计算得出的降水强度(R_p)对照表 1,查出降水强度指数(I)。

ΔI 表征日雨量的极端程度,用站点日雨量观测

值(r)与 1951—2010 年降水量最大值(r_{i11})的算术平均值的距离和 r_{i11} 与其算术平均值的距离的比值表示,计算方法如下:

$$\Delta I = \frac{\sqrt{(r - \frac{r_{i11}}{2})^2}}{\sqrt{(r_{i11} - \frac{r_{i11}}{2})^2}} = \frac{r - \frac{r_{i11}}{2}}{\frac{r_{i11}}{2}} = \frac{2r}{r_{i11}} - 1 \quad (3)$$

表 1 降水强度指数划分

Table 1 Precipitation intensity index division

降水强度	指数	降水强度	指数
$[r_{i1}, r_{i2})$	1	$[r_{i7}, r_{i8})$	7
$[r_{i2}, r_{i3})$	2	$[r_{i8}, r_{i9})$	8
$[r_{i3}, r_{i4})$	3	$[r_{i9}, r_{i10})$	9
$[r_{i4}, r_{i5})$	4	$[r_{i10}, r_{i11})$	10
$[r_{i5}, r_{i6})$	5	$[r_{i11}, \infty)$	11 + ΔI
$[r_{i6}, r_{i7})$	6		

2.2 持续时间(T_0)和指数(T)

按照降水过程的起始和结束时间的定义,站点降水持续时间计算如下:

$$T_0 = T_e - T_s + 1 \quad (4)$$

式中, T_e 为降水结束时间(公历日期), T_s 为降水开始时间(公历日期),单位均为 d。

落至地面的降水有一部分通过蒸发、蒸腾等作用消散,降水过程的实际影响是剩余下来的有效降水的影响,为了计算有效降水,Kohler and Linsley(1951)发展的一种基于水文数据预测地表径流的前期降雨指数 API(antecedent precipitation index)方法,提出衰减指数 K 。Crozier and Eyles(1980)和 Crozier(1986)将指数 K 引入降雨引发的滑坡预报研究,作为前期土壤含水量指数。从有效降水影响的角度,本文将衰减指数 K 引入降水过程综合强度的计算,消除落入地面降水随着时间出现的衰减现象,换算为有效降水时间:

$$T = \sum_{i=0}^{T_0-1} K^i \quad (5)$$

式中, K 为降水衰减指数, T_0 为降水持续时间(单位:d)。

关于衰减指数 K ,在不同地区不同季节存在差异,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所(2000)在《中国泥石流》中取 $K = 0.8$;王礼先和于志民(2001)在研究北京地区的泥石流时则取 $K = 0.8$;本文计算时取值 0.8。

2.3 覆盖范围(C_p)和指数(C)

按照文中区域降水过程的定义,覆盖范围(C_p)为录入降水过程站点(n)占评估区站点(N)的比例,计算公式如下:

$$C_p = n/N \quad (6)$$

式中, n 为录入降水过程的站点数(单位:个), N 为评估区域站点总数(单位:个)。

结合气象服务精确化业务需求,改进降水覆盖范围指数划分,直接将覆盖范围带入评估公式,但考虑与降水强度、持续时间量级一致,将覆盖范围指数定义为:

$$C = 10C_p \quad (7)$$

3 降水过程综合强度评估模型的建立

3.1 降水过程综合强度评估模型

降水过程综合强度是日降水强度、覆盖范围和持续时间 3 个指标共同作用的结果,在评估降水过程综合强度时 3 个评价指标缺一不可。本文采用 Davidson and Lambert(2001)和张继权等(2007)自然灾害风险的数学计算方法,建立降水过程综合强度评估模型,计算降水过程综合指数。

单站降水过程强度指数(RSI):

$$RSI = IT \quad (8)$$

式中, I 为日降水强度指数, T 为持续时间指数。

区域降水过程综合强度指数(RPI):

$$RPI = \sum_{j=1}^n \frac{RSI_j C}{n} \quad (9)$$

式中, RSI 为站点降水过程强度指数, n 为录入降水过程的站点数, C 为覆盖范围指数。

3.2 降水过程综合强度等级划分

应用降水过程强度等级评估模型,计算 1961—2010 年我国主要流域、31 个省(区、市)、一级气象地理区划(中国气象局预测减灾司和中国气象局国家气象中心,2006)区域降水过程综合强度指数,最大降水过程综合强度指数 251.96,最小为 0.02,各级降水过程综合强度指数的概率分布见图1。通过分析区域和单站降水过程强度指数概率密度分布,将

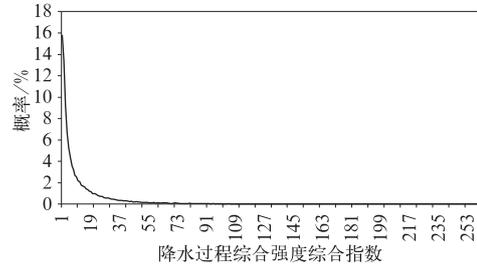


图 1 1961—2010 年降水过程综合强度指数分布

Fig. 1 Distribution of comprehensive intensity index of precipitation processes during 1961—2010

极端、特强、强、较强、中等五个等级降水过程按照出现概率约 0.5%、5%、10%、14.5%、70% 进行划分,单站和区域降水过程强度等级划分标准见表 2。

表 2 单站和区域降水过程综合强度等级划分

Table 2 Comprehensive intensity grade division of single station and regional precipitation processes

强度等级	指数范围	
	单站降水过程	区域降水过程
中等	$RSI < 4$	$RPI < 10$
较强	$4 \leq RSI < 8$	$10 \leq RPI < 20$
强	$8 \leq RSI < 12$	$20 \leq RPI < 40$
特强	$12 \leq RSI < 16$	$40 \leq RPI < 100$
极端	$RSI \geq 16$	$RPI \geq 100$

4 检验与应用

4.1 区域检验

由式(2)计算 1961—2010 年主要流域的降水强度(图 2),从极端、特强、强、较强、中等五个等级平均降水强度来看(黄线),珠江流域最高,其次是淮河流域、太湖流域、长江流域,南方流域降水强度较北方明显偏强,黄河流域降水强度最弱,其次是松花江流域;从主要流域极端降水过程的降水强度看,海河流域、淮河流域、珠江流域和太湖流域降水强度相对其他流域高,最大降水强度出现在太湖流域和淮河流域,太湖流域降水强度 90 mm 以上的次数达 10 次,其次是淮河流域(4 次)。这造成了太湖流域和淮河流域洪水灾害多发。由上可见,降水强度的地域差异大,但从降水影响来看,同样强度的降水在东

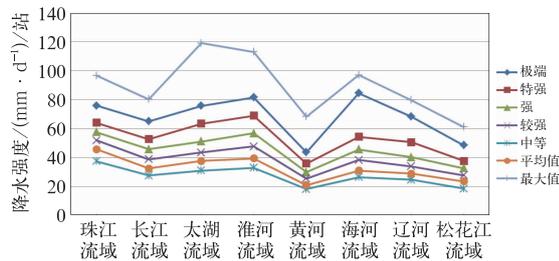


图 2 1961—2010 年主要流域降水强度分布
Fig. 2 Distribution of rainfall intensity over the main drainage basins during 1961—2010

南沿海地区影响不大,但会给内陆地区带来严重灾害,例如降水强度相对弱的松花江流域 1998 年和 2013 年发生了严重的洪水灾害。因此,基于 2.1 节定义对降水强度进行指数划分(表 3),降水强度越强,指数越大。指数划分后,主要流域各指数分布相对均匀,松花江流域指数 6 以上的降水过程达到 3 次。文中降水强度指数划分统一了各地降水强度标准。

历史上我国主要流域均发生过洪水灾害,灾害的发生除与降水强度密切相关外,还与降水的持续

表 3 1961—2010 年主要流域降水强度指数

Table 3 Distribution of rainfall intensity indexes over the main drainage basins during 1961—2010

降水强度 指数	流域							
	珠江流域	长江流域	太湖流域	淮河流域	黄河流域	海河流域	辽河流域	松花江流域
[6,10)	1	1	14	1	0	2	1	3
(6,5]	9	11	50	8	6	5	14	26
(5,4]	158	79	131	77	50	62	70	117
(4,3]	523	262	249	253	206	240	275	311
(3,0)	1148	1567	1026	1049	1131	940	918	926

时间和影响面积有关,甚至是多次降水过程叠加影响造成的。统筹对降水过程综合强度评估非常重要,基于降水过程强度等级分布,统计 1961—2010 年我国主要流域降水过程出现的次数和综合强度等级分布,表 4 结果显示,长江流域降水过程出现次数最多,共出现降水过程 1920 次,其中极端降水过程为 25 次,特强为 94 次,强为 169 次,较强为 261 次,中等为 1371 次;珠江流域降水过程强度比其他流域偏强,极端(31 次)、特强(160 次)、强(271)、较强(299 次)等强度等级的降水过程均为各流域最多;

海河流域降水过程次数最少,共出现降水过程 1249 次,其中极端降水过程 3 次(分别出现在 1996 年 7 月 26 至 8 月 5 日、1984 年 8 月 8—12 日、1989 年 7 月 16—23 日),特强为 51 次,强为 95 次,较强为 187 次,中等为 913 次。主要流域极端、特强、强、较强、中等强度等级的降水过程占总降水过程的百分比分别为 0.7%、5.3%、10.6%、15.2%、68.2%,上述比例与降水过程强度等级划分标准值基本一致。

表 4 1961—2010 年主要流域降水过程综合强度等级统计

Table 4 Statistics of rainfall process intensity level over the main drainage basins during 1961—2010

降水过程综合 强度等级	流域							
	珠江流域	长江流域	太湖流域	淮河流域	黄河流域	海河流域	辽河流域	松花江流域
极端	31	25	12	4	3	3	3	16
特强	160	94	89	53	36	51	58	107
强	271	169	161	156	121	95	126	176
较强	299	261	242	210	210	187	197	199
中等	1078	1371	966	965	1023	913	894	885

对 31 个省(区、市)降水强度进行分析(图 3),从平均降水强度来看(黄线),海南降水强度最高,而后依次为广东、广西、福建、江西等省(区);从极端降水过程的降水强度看,海南、天津、广东、河北、江苏、上海、安徽、湖北等地降水强度相对其他地区高,最

大降水强度出现在上海、天津、海南、北京,降水强度均大于 150(mm·d⁻¹)/站,其次是江苏、广西、安徽、广东、江西、福建、湖北、山东、浙江等地,降水强度均大于 100(mm·d⁻¹)/站。我国西部地区降水强度相对偏小,以新疆降水强度最弱。

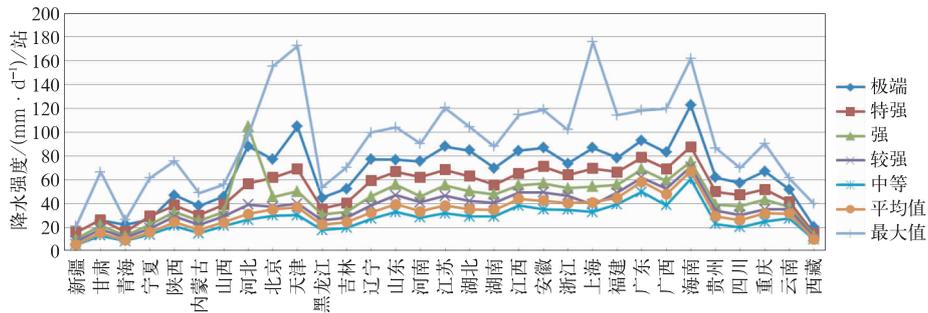


图 3 1961—2010 年 31 个省(区、市)降水强度分布
Fig. 3 Distribution of rainfall intensity in 31 provinces (autonomous regions and municipalities) during 1961—2010

由 1961—2010 年 31 个省(区、市)5 个强度等级降水过程百分比分布(图 4), 极端、特强、强、较强、中等 5 个降水过程强度等级百分比的平均值(图中虚线)分别为 0.6%、5.7%、10.8%、15.2%、67.7%, 这与降水过程强度等级划分标准值(图中红色粗实线)基本一致, 标准偏差为 0.004、0.025、

0.03、0.026、0.077。特强和强两个等级降水过程标准偏差相对较大, 主要是由于极端或强降水过程地域性差异大, 相对而言, 南方极端降水过程多, 北方少, 东部多, 西部少。由表 5, 广西、海南、云南、广东极端降水过程在 20 次以上, 四川、贵州、江西、安徽、上海、福建、吉林、浙江、重庆极端强降水过程 10~



图 4 1961—2010 年 31 个省(区、市)降水过程综合强度等级百分比
Fig. 4 Statistics of precipitation process intensity grade percentages in 31 provinces (autonomous regions and municipalities) during 1961—2010

表 5 1961—2010 年 31 个省(区、市)降水过程综合强度等级分布(单位: 次数)
Table 5 Distribution of precipitation process intensity grade in 31 provinces (autonomous regions and municipalities) during 1961—2010

降水过程综合等级强度	新疆	甘肃	青海	宁夏	陕西	内蒙古	山西	河北	北京	天津	黑龙江	吉林	辽宁	山东	河南	江苏	湖北	湖南	江西	安徽	浙江	上海	福建	广东	广西	海南	贵州	四川	重庆	云南	西藏
极端	0	1	2	1	4	8	2	3	9	4	9	12	6	4	2	8	6	7	14	13	10	13	11	20	28	25	15	16	10	24	7
特强	2	54	32	25	55	62	50	47	62	59	109	113	56	43	47	65	77	125	114	65	96	106	124	161	185	199	150	145	169	140	33
强	31	163	98	98	142	120	118	105	102	103	204	192	117	155	137	146	168	210	197	182	190	188	198	271	263	231	264	196	277	207	62
较强	123	227	174	156	209	192	184	167	154	134	202	204	198	190	190	247	265	315	359	277	321	240	287	281	349	284	331	252	279	256	115
中等	1650	1116	1155	794	1011	961	912	881	677	568	886	943	882	800	937	1054	1079	1321	1226	1000	1178	662	1176	910	1008	1321	116	1168	1137	974	1137

16 次,其他省(区、市)不足 10 次。新疆极端降水过程 0 次,特强降水过程仅 2 次,在 31 个省(区、市)中最少。这些均与我国降水时空分布特征基本吻合。

由此可见,主要流域和 31 个省(区、市)极端、特强、强、较强、中等 5 个等级的降水过程所占比例与标准值基本一致。

4.2 个例应用

4.2.1 北京 2012 年“7·21”和 2016 年“7·18”暴雨个例

应用上述方法,评定北京 2012 年 7 月 21 日暴雨(“7·21”过程;周宁芳,2012)和 2016 年 7 月 18 日暴雨(“7·18”过程;符娇兰等,2017;权婉晴和何立富,2016)均是极端降水过程。由表 6 比较两次过程单站降水强度,“7·21”过程降水强度指数偏大,强度偏强,石景山、门头沟、房山、霞云岭、斋堂、密云等站降水强度达到极端水平(降水强度指数>10);“7·18”过程,仅石景山和斋堂降水强度达到极端(降水强度指数>10),由式(2)计算“7·21”过程降水强度为 194.36(mm·d⁻¹)/站,为 1961 年以来最强,远高于“7·18”过程降水强度 133.28(mm·d⁻¹)/站。由表 6 比较两次过程降水过程综合强度等级,“7·18”过程单站降水过程强度等级偏大,由

于“7·18”过程降水持续 4 d,大暴雨站点占北京市国家气象观测站的 98%,全市平均降水量为 212.6 mm,石景山、斋堂、房山、门头沟、海淀、丰台、大兴、北京南郊观象台、霞云岭、朝阳等地降水过程综合强度等级达到极端水平;而“7·21”过程暴雨仅持续 1 d,大暴雨站点占北京市国家气象观测站的 86%,全市平均降水量 190.3 mm,仅石景山达到极端。由此可见,“7·21”过程降水强度比“7·18”明显偏强,但因降水持续时间短,降水过程综合强度等级比“7·18”过程偏小。上述计算结论是在降水强度中 *a, b, c* 的权重均取 1/3,降水随时间的衰减指数 $K=0.8$ 情况下的结论。从大暴雨的面积、累计降水量、影响时间等方面看,“7·18”要大于“7·21”过程,但从灾害影响角度来说,“7·21”造成北京 79 人死亡、160.2 万人受灾、经济损失约 120 亿元,而“7·18”过程几乎无明显灾情。这与扈海波等(2013)暴雨灾害致灾主要体现在降水强度上一致,同时与城市防灾减灾能力密切相关。在实际应用中,可以根据各地的情况适当调整降水强度中 *a, b, c* 的权重,增大对当地影响重的因子权重;降水衰减指数 $K=0.8$ 是研究泥石流灾害时的取值,对于城市,由于地面硬化和城市防灾减灾能力作用,*K* 的取值可根据当地情况减小。以北京为例,(1)在

表 6 北京地区“7·21”和“7·18”过程降水强度指数和综合强度指数比较

Table 6 Comparison of “7·21” rainstorm in 2012 and “7·18” rainstorm in 2016 in Beijing

站点	“7·21”过程			“7·18”过程		
	降水强度指数	综合强度指数	等级	降水强度指数	综合强度指数	等级
顺义	10	10	强	7	7	较强
海淀	10	10	强	10	18	极端
延庆	6	6	较强	8	14.4	特强
佛爷顶	7	7	较强	7	12.6	特强
汤河口	8	8	强	9	9	强
密云	12.03	12.03	特强	9	9	强
怀柔	10	10	强	5	9	强
上甸子	10	10	强	5	5	较强
平谷	10	10	强	6	10.8	强
通州	9	9	强	6	14.64	特强
朝阳	10	10	强	9	16.2	极端
昌平	8	8	强	7	12.6	特强
斋堂	12.83	12.83	特强	13.49	24.282	极端
门头沟	15.28	15.28	特强	8	19.52	极端
北京南郊观象台	10	10	强	10	18	极端
石景山	19.31	19.31	极端	13.13	23.634	极端
丰台	10	10	强	10	18	极端
大兴	10	10	强	10	18	极端
房山	13.99	13.99	特强	10	24.4	极端
霞云岭	15.74	15.74	特强	9	16.2	极端

$K=0.8$ 情况下,调整降水强度中的权重 a, b, c , 增加 b 和 c 的权重,特别是 c 的权重,减少 a 的权重,两者降水强度差距明显增大,降水过程综合强度评估结果差距明显缩小,“7·21”过程降水强度和过程综合强度均增大;反之,则相反;但是“7·21”过程降水过程综合强度仍比“7·18”偏小。(2)在降水强度中 a, b, c 的权重均为 $1/3$ 的情况下,调整衰减指数 K ,当 K 减小时,“7·21”和“7·18”过程两者的降水过程综合强度差距缩小,当 $K=0.3$ 时,“7·21”(综合强度指数 108.6)降水过程综合强度大于“7·18”过程(综合强度指数 108.1)。(3)同时调整降水强度中 a, b, c 的权重和降水衰减指数 K ,当 $a=0.2, b=0.2, c=0.6, K=0.35$ 时,“7·21”(综合强度指数 107.9)降水过程综合强度大于“7·18”过程(综合强度指数 107.4)。由此可见北京地区防灾减灾能力对降水灾害减轻作用重大。在气象服务中,各地可根据当地实际情况,调查当地的降水灾害影响因子及防灾减灾能力,调整降水强度中 a, b, c 的权重,以及降水衰减指数 K ,得出适用于当地的模型参数。

4.2.2 长江中下游地区 2016 年 6 月强降雨两个例

2016 年 6 月以来,长江中下游持续强降雨(权婉晴和何立富,2016;曹艳察和张涛,2016;袁媛等,

2017a;2017b),降雨时段集中在 5 月 31 日至 6 月 3 日、6 月 7 日、6 月 10—12 日、6 月 14—15 日、6 月 18—28 日、6 月 30 日至 7 月 6 日。尤其是 6 月中旬以来,接连出现较强、强、特强、极端强降水过程,6 月 30 日至 7 月 6 日极端降水过程为有气象记录以来第四强(表 7),仅次于“69·7”、“98·6”和“10·7”过程,但降水强度是极端降水过程中的第一位。截至 7 月 3 日,长江中下游形成洪峰,干流监利至大通江段全线超警,这是 1999 年以来第一次出现中下游干流全线超警现象。城陵矶水位接近保证水位,汉口水位列历史最高水位第五位。6 月 30 日强降雨以来,长江干堤发生管涌等险情 15 处,洞庭湖、鄱阳湖湖区堤防发生险情 482 处,其他堤防发生险情 1352 处。流域内 10 个省、625 个县(市、区)受灾,因洪涝灾害造成直接经济损失 1030 亿元,其中水利工程水毁直接经济损失 188 亿元。长江中下游灾情与降水过程强度评估结果具有很好的吻合度,说明该方法对降水过程评估的合理性。

由此可见,本方法对单站和区域降水过程强度等级评估方法既能体现降水过程地域特征,又能表征降水过程的影响程度,方法具有可操作性,可直接应用于气象服务业务,以其作为参考依据。

表 7 1961—2016 年长江中下游流域历史极端降水过程统计

Table 7 Historical extreme rainfall process statistics in the middle and lower reaches of Yangtze River Basin during 1961—2016

过程起始时间	降水强度 /[$(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1})/\text{站}$]	持续天数 /d	覆盖范围 /%	区域综合 强度指数
1969 年 6 月 22 日至 7 月 17 日	72.79	26	89	146.85
1998 年 6 月 11—27 日	79.67	17	86	146.03
2010 年 7 月 8—25 日	89.74	18	80	126.64
2016 年 6 月 30 日至 7 月 6 日	94.78	7	70	112.77
1991 年 6 月 30 日至 7 月 12 日	89.42	13	61	111.87
1999 年 6 月 22 日至 7 月 1 日	72.22	10	83	110.39
1996 年 7 月 7—18 日	72.98	12	91	105.1
1982 年 6 月 11—21 日	74.79	11	88	101.64

5 结论与讨论

对前期研究(王莉萍等,2015)基础上的改进,主要包括以下四个方面:(1)利用降水点特征取代面特征,不划分暴雨敏感区,用各地历史观测站资料分析站点降水背景来表征其地域特征,提取 2410 个国家站日雨量百分位数为 90% 值作为降水过程临界值,

定义单站和区域降水过程起始和结束时间;(2)考虑短时降水致灾影响,在评估模型中进一步改进评价要素,将小时降水资料融入评估模型;(3)细化评价要素分级,将降水强度分为 11 级,对覆盖范围和持续时间不分级,直接无量纲化为评估指标;(4)考虑地面降水蒸腾和蒸发等作用的消散,评估模型中加入降水随着时间的衰减影响;(5)考虑极端降水天气增多,在降水过程综合强度等级划分时,除特强、强、

较强和中等强度等级外,增加单站和区域极端降水过程界定。

上述研究改进了暴雨灾害敏感区划分为四类较粗略的缺陷,能够体现各地降水敏感性;融入小时雨强,使对降水过程综合强度等级评估更客观、合理;对降水过程评价指标细化分级,提高降水过程综合强度指数计算精度;面向气象服务业务,结合近年来极端天气频发,实现了对降水过程极端性评价的需求。虽然该评估方法是利用站点观测数据,但可以通过站点信息格点化,结合预报产品(EC、T639、NCEP及中央气象台QPF等降水预报产品和预警产品)实现对某区域将发生的降水过程综合强度快速定量预评估。

利用改进的评估模型对主要流域、31个省(区、市)、北京地区、长江中下游地区等地的降水过程进行了等级评估、比对及可行性验证,结果显示评估结果与实际基本相符,有一定的可操作性。可以对中国范围内任意区域的历史降水过程综合强度大小进行快速定量评判,可用于降水过程的历史比对和影响分析。但在模型计算时,式(2)中 a, b, c 这三个权重系数选取主要依据当地的降水特征和致灾影响因子,式(5)中 K 值与土地利用类型和防灾减灾能力关系密切,均需要一定的参数优化方法,有待进一步解决。另外,目前降水过程起始和结束按天来划分,对于时间界定不够精细,下一步研究将按小时界定降水过程的起始和结束,实现对最新监测实况和短临预报产品的强度评估。通过与近几年中央气象台统计的南方地区和北方地区降水过程比对发现,50、100 mm降水覆盖面积越大,最大过程雨量、日雨量和小时雨强越大,过程持续时间越长,降水过程综合强度越强,具有很好的匹配关系,在气象服务中本文的评估方法能够综合考虑降水强度、覆盖范围和持续时间对降水过程综合强度定量评价,评定结果与降水实况相符,但是由于降水过程定义时没有考虑天气形势特点及降水点的移动性和距离性,对大区域(全国区域、南方、北方)降水过程起始和结束的还存在自动判别不明显的现象,还有待下一步工作改进。

此外,该模型主要是基于气象数据方面致灾因子的研究,缺乏社会经济、人口分布、暴雨灾情及防灾减灾能力等信息,对于灾害影响的预估能力尚存不足,有待后续工作中解决。

参考文献

- 曹艳察,张涛,2016.2016年6月大气环流和天气分析[J].气象,42(9):1154-1160.
- 陈艳秋,袁子鹏,盛永,等,2006.基于概率分析的暴雨事件快速评估模型[J].气象与环境科学,22(5):62-65.
- 陈悦丽,陈德辉,李泽椿,等,2016.降雨型滑坡的集合预报模型及其初步应用的试验研究[J].大气科学,40(3):515-527.
- 程肖侠,梁奇琛,蔡新玲,2014.陕西省单站暴雨特征及评估方法[J].干旱区地理,37(1):66-73.
- 符娇兰,马学款,陈涛,等,2017.“16·7”华北极端强降水特征及天气学成因分析[J].气象,43(5):528-539.
- 甘衍军,徐晶,赵平,等,2017.暴雨致洪预报系统及其评估[J].应用气象学报,28(4):385-398.
- 扈海波,轩春怡,诸立尚,2013.北京地区城市暴雨积涝灾害风险预评估[J].应用气象学报,24(1):99-108.
- 李春梅,刘锦莹,潘蔚娟,等,2008.暴雨综合影响指标及其在灾情评估中的应用[J].广东气象,30(4):1-4.
- 李中平,毕宏伟,张明波,2008.我国山洪灾害高易发降雨区分布研究[J].人民长江,39(17):61-63.
- 刘国纬,沈国昌,2006.中国年最大致洪暴雨落区研究[J].水科学进展,17(2):151-159.
- 刘仁志,倪晋仁,2004.中国暴雨泥石流危险性区划[J].应用基础与工程科学学报,12(4):346-360.
- 柳源,1998.滑坡临界暴雨强度[J].水文地质工程地质,25(3):43-45.
- 权婉晴,何立富,2016.2016年7月大气环流和天气分析[J].气象,42(10):1283-1288.
- 邵未兰,张宁,岳阳,等,2009.基于距离函数的区域性暴雨灾害风险预估方法研究[J].暴雨灾害,29(3):268-273.
- 石艳,李怀志,2012.贵州省区域性暴雨事件快速评估模型研究[J].贵州气象,36(6):36-39.
- 王家祁,骆承政,2006.中国暴雨和洪水特性的研究[J].水文,26(3):33-36.
- 王莉萍,王秀荣,王维国,2015.中国区域降水过程综合强度评估方法研究及应用[J].自然灾害学报,24(2):186-194.
- 王礼先,于志民,2001.山洪及泥石流灾害预报[M].北京:中国林业出版社:125-126.
- 王秀荣,吕终亮,王莉萍,等,2016.一种简化的暴雨灾害风险及影响评估方法和应用研究——以京津冀“7·21”暴雨事件为例[J].气象,42(2):213-220.
- 吴振玲,史得道,吕江津,等,2012.利用欧氏距离函数评估海河流域暴雨灾害[J].灾害学,27(3):48-53.
- 袭祝香,2008.吉林省重大暴雨过程评估方法研究[J].气象科技,36(1):78-81.
- 袭祝香,孙力,刘实,2009.吉林省单站暴雨特征分析及评估方法[J].气象科学,29(2):230-234.
- 杨辰,王强,顾宇丹,2017.上海市城市暴雨内涝评估建模及模拟研究[J].气象,43(7):879-886.
- 袁慧敏,王秀荣,范广洲,等,2012.长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型及应用[J].气象,38(10):1189-1195.

- 袁媛,高辉,李维京,等,2017a. 2016年和1998年汛期降水特征及物理机制对比分析[J]. 气象学报,75(1):19-38.
- 袁媛,高辉,柳艳菊,2017b. 2016年夏季我国东部降水异常特征及成因简析[J]. 气象,43(1):115-121.
- 张春山,张业成,张立海,2004. 中国崩塌、滑坡、泥石流灾害危险性评价[J]. 地质力学学报,10(1):27-32.
- 张继权,梁警丹,周道玮,2007. 基于GIS技术的吉林省生态灾害风险评价[J]. 应用生态学报,18(8):1765-1770.
- 张廷治,李守智,李祥云,等,1996. 诱发山洪泥石流特强暴雨的特征[J]. 气象,22(5):43-47.
- 赵健,范北林,2006. 全国山洪灾害时空分布特点研究[J]. 中国水利,(13):45-47.
- 郑国,薛建军,范广洲,等,2011. 淮河上游暴雨事件评估模型[J]. 应用气象学报,22(6):753-758.
- 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,2000. 中国泥石流[M]. 北京:商务印书馆:321.
- 中国气象局预测减灾司,中国气象局国家气象中心,2006. 中国气象地理区划手册[M]. 北京:气象出版社:1-3.
- 周宁芳,2012. 2012年7月大气环流和天气分析[J]. 气象,38(10):1307-1312.
- Crozier M J, 1986. Landslides: Causes, Consequences and Environment[M]. London: Croom Helm: 185-189.
- Crozier M J, Eyles R J, 1980. Assessing the probability of rapid mass movement[M]// Proceedings of the 3rd Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Wellington: New Zealand Institute of Engineers: 247-253.
- Davidson R A, Lambert K B, 2001. Comparing the hurricane disaster risk of U. S. coastal counties[J]. Natl Hazards Rev, 2(3): 132-142.
- Kohler M A, Linsley R K, 1951. Predicting the run-off from storm rainfall[R]. Washington: U. S. Government Printing.