

# 强降水持续过程对上海市内交通 经济损失评估模型初探\*

黄琰<sup>1)2)</sup> 董文杰<sup>3)</sup> 支蓉<sup>4)</sup> 龚志强<sup>4)†</sup>

1)(中国科学院东亚区域气候环境重点实验室,北京 100029)

2)(中国科学院研究生院,北京 100049)

3)(北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875)

4)(国家气候中心,中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081)

(2010年7月27日收到;2010年8月10日收到修改稿)

通过探讨极端降水与城市道路交通受灾损失之间的关系确定灾损函数曲线,首先构建城市道路积水排尽模型、积水持续时间模型,以及道路积水的经济损失评估模型等理论模型,再引入与道路抗涝能力相关的社会经济因子,最终构建了一个极端降水对道路交通造成经济损失的估算模型.经检验,该模型具有较好的模拟性能和适用性,且所需输入变量少,计算简便,适合地区经济损失的快速评估.从该模型出发,确定了上海地区逐年极端降水降水强度和总过程降水量的阈值,从而提出一个新的极端降水定义方法——随影响因子变化的固定阈值法,该方法突出了极端降水给社会带来灾害损失这一社会特性,与其他方法相比更具社会实用价值.

**关键词:** 极端降水, 极端降水-经济损失模型, 阈值

**PACS:** 92.60.Wc

## 1. 引言

中国是世界上的气候脆弱区之一,资料统计显示,降水异常引发的洪涝灾害在一般年份所造成的经济损失约占气象灾害总损失的27.5%<sup>[1]</sup>.如今全球气候变暖,极端天气气候事件进入频发期,由此造成的气象灾害,尤其是旱、涝灾害明显增多.据统计,目前我国各类自然灾害造成的经济损失占年均GDP的3%—5%,而因极端气候事件造成的经济损失约占其中的65%<sup>[1,2]</sup>.我国受洪灾威胁的地区分布在江河流域附近人口与资产最密集的区域,随着经济的快速发展,城市人口日益增多,城市规模也不断扩大,社会财富高度集中,导致人们对自然环境变化的依赖程度随之增加,因此洪涝灾害对经济社会的发展,尤其是城市居民生产生活的影响日益增大<sup>[3]</sup>.在此背景下,研究极端降水事件如何对社会经济,特别是受天气影响较大的城市交通运输造

成影响,影响的程度如何衡量,这都是开展城市防灾减灾工作的重要基础和前提.

目前,针对经济损失与气象灾害因子之间关系的灾害评估模型已开展了一系列研究并取得了一定的成果,如引入气象因子的计量经济模型的应用,绘制灾损曲线以建立降水与损失之间的回归模型,在水文和水动力模型基础上构建洪灾损失评估模型等<sup>[4-9]</sup>.但值得指出的是,部分模型的构建方法还相对粗糙,如将气象要素作为一个外延变量引入计量经济模型,用回归模型反映极端降水与灾情损失之间的关系等,它们都忽略了极端降水引发的洪涝作用于受灾体的物理过程;而部分以水文和水动力模型为基础的洪灾损失评估模型能很好的模拟出受灾体的受灾过程,目前大部分城市洪水的分析模拟模型<sup>[10-14]</sup>都是基于水动力模型构建的.但这些模型使用的前提是需要掌握研究区域较详尽的地形分布、土地利用、排水道管网分布等数据,模型所需输入数据量大,对数据精度要求较高,而这些数

\* 国家自然科学基金(批准号:40875040, 40775048, 40930952),公益性行业科研专项(批准号:GYHY200806005)和国家科技支撑计划(批准号:2007BAC29B01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail:gzq0929@126.com

据不易获取,这使模型的使用受到限制.因此,有必要在前人所建模型的基础上,发展一个能对极端降水事件造成城市道路经济损失进行模拟和评估的模型,该模型能总体上模拟出洪水对道路交通致灾的物理过程,而且适用于不同经济背景地区的城市道路交通受洪涝影响的经济损失评估.本文选取能较好描述降水极值特征的因子为自变量,将极端降水造成的经济损失作为因变量,构建了一个参数化的函数模型,该模型能定量描述极端降水与城市道路交通经济损失之间的关系.首先建立和运用交通、经济学领域的各种理想模型,对城市交通的具体受灾过程进行了详细的描述,在此过程中对一些物理过程进行了适当的简化,以减少输入变量及计算量,使模型使用更灵活,适用于无法获得城市街道和排水管道分布以及城市地形、土地利用等精确数据地区的洪涝灾害损失的快速评估.

随着对气象和气候极端事件的深入研究,极端事件的一些总体特征逐渐被揭示出来,这也为如何用极端天气(气候)因子准确地描述极端事件的特点成为可能<sup>[15-29]</sup>.但目前气象领域所定义的极端降水与社会经济领域中所关注的给社会经济带来严重影响的极端降水并不相符,传统的极端降水定义方法不完全适用于社会经济领域,因此同样有必要重新对极端降水的定义开展研究,从而将极端降水给社会造成经济损失的社会性突显出来,使新的极端降水定义方法能在社会经济领域得到推广和应用.

## 2. 数据和方法

### 2.1. 研究区域选择

上海地处长江入海口,地势平坦,境内河流众多,主要受亚热带季风气候的影响,汛期暴雨频繁,深受暴雨、洪涝灾害的影响.随着国民经济的快速发展,上海地区的城市化进程也不断加快,2008年城市化率已接近90%<sup>[30]</sup>,导致社会对自然环境变化的依赖程度增强,极端降水给城市社会经济造成的损失日益增加.选择上海地区作为研究区域,城市道路交通部门作为研究对象,对该地区极端降水造成的城市交通损失进行研究.

### 2.2. 数据来源

降水数据来自中国气象局气象信息中心气象

资料室发布的中国地面气候观测数据集,从中选取了上海地区两个台站1951—2008年的逐日降水数据.经济数据来自《中国统计年鉴》(2009)和《上海统计年鉴》(1983—2009).灾情数据来源于《中国气象灾害大典》(上海卷).

### 2.3. 研究方法

对上海龙华站1951—2008年的逐日降水数据进行分析可知(如图1,图2),上海地区日降水量 $\geq 25$  mm的降水发生频率在近60年约为9%,其方差贡献率约为77.3%;其中夏、秋两季发生的频率较高,在10%以上,而冬春两季发生频率则低于5%. $\geq 25$  mm降水在春、夏、秋三季的方差贡献率均在60%以上,而冬季仅为31.2%.上世纪60年代以来,除春季外,上海地区 $\geq 25$  mm的降水无论从发生频率还是方差贡献率上都呈上升趋势,其中夏季的发生频率和冬季的方差贡献率增加最明显.

从以上分析看出,近60年上海地区 $\geq 25$  mm的降水的累积概率小于10%,处于极端降水水平,近10年虽然 $\geq 25$  mm的降水发生频率明显增加(11.9%),但也接近10%,因此取25 mm作为上海地区的初始极端降水阈值比较合理.

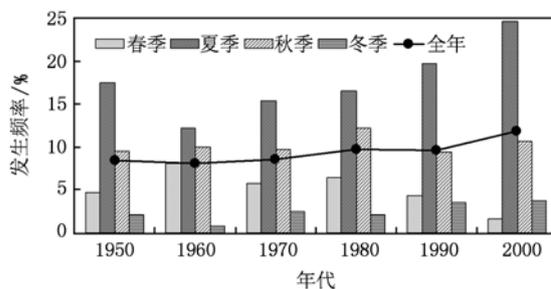


图1 各年代上海地区 $\geq 25$  mm降水的发生概率

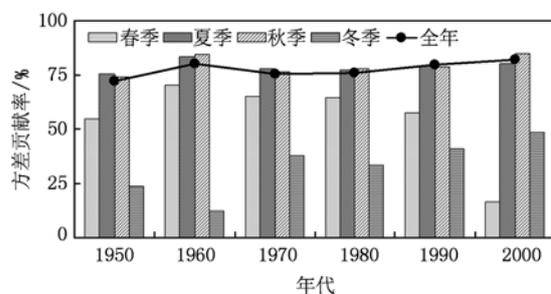


图2 各年代上海地区 $\geq 25$  mm降水的方差贡献率

若某一测站连续 $N$ 天( $N \geq 1$ )的日降水量均大于25 mm,就把这 $N$ 天的连续强降水看作一个极端

降水过程. 从台站降水量逐日值观测数据中挑选了若干个极端降水过程进行分析(如表 1 所示).

表 1 建模选用的灾害个例<sup>[30,31]</sup>

序号	日期	地区	降水强度 /(mm/d)	过程总降水 量/mm	受淹路 段/条	道路积水 深度/cm	当年城市排水管 道长度/km
1	1980. 8. 17	上海全市	74. 8	74. 8	190	22. 8	1370
2	1983. 6. 25	上海全市	81. 4	81. 4	170	26. 8	1453
3	1985. 8. 31—9. 3	上海全市	64. 7	194. 1	235	75. 0	1502
4	1988. 9. 3—9. 4	上海全市	68. 4	136. 8	246	29. 5	1751
5	1989. 7. 24—7. 26	上海全市	66. 3	66. 3	50	22. 8	1886
6	1990. 5. 30	上海全市	61. 6	61. 6	20	25. 0	1892
7	1991. 8. 7—8. 8	上海全市	136. 2	272. 3	574	35. 0	1942
8	1993. 7. 26—7. 27	上海全市	109. 3	109. 3	100	20. 0	2132
9	1993. 8. 1—8. 2	上海市区部分地区和东北部郊区	111. 9	111. 9	238	30. 0	2132
10	1995. 5. 19—5. 20	上海全市	73. 0	145. 9	129	30. 0	2536
11	1995. 6. 20—6. 21	上海全市	61. 0	61. 0	60	25. 0	2536
12	1995. 6. 24—6. 25	上海全市	116. 3	116. 3	393	30. 0	2536
13	1995. 6. 30—7. 2	上海全市	76. 7	153. 4	100	35. 0	2536
14	1995. 6. 30—7. 2	上海全市	107. 5	107. 5	200	25. 0	2536
15	1996. 7. 5—7. 6	上海全市	115. 0	229. 9	200	35. 0	2898
16	1997. 7. 10—7. 11	上海全市	82. 2	164. 3	92	25. 0	3023
17	1998. 7. 23—7. 24	上海全市	63. 3	126. 5	130	29. 5	3651

通过以下几个步骤可建立受灾因子的特征量与极端降水因子、社会经济影响因子间的数学模型:

第 1 步,将受灾因子与降水因子及各种可能的社会经济影响因子分别绘制散点图,确定模型的函数形式和相关性;

第 2 步,挑选可靠性较好、精度较高,序列长度较长,且与经济损失密切相关的影响因子引入模型中;

第 3 步,将部分复杂、不易描述的过程参数化或区域平均化,建立理想模型;

第 4 步,用研究区域数据对所建模型进行参数估计.

通过建立经济损失与气象因子之间的参数模型,再根据该模型推算出当灾害损失减少为零时气象因子的阈值,该阈值能反映气象因子同社会经济损失之间的关系,因此具有经济学上的意义.

### 3. 模型的建立

#### 3.1. 极端降水 - 受淹街道评估模型

经分析可知,极端降水过程的降水强度(极端

降水过程中的日平均降水量)和受淹路段条数有较好的正相关关系(如图 3),这种关系可用幂函数的形式描述. 选取历年城市排水管道长度作为与城区道路排涝能力相关的社会经济因子,在考虑社会经济影响因子的情形下,运用幂函数的形式可建立降水强度 - 受淹路段条数模型

$$N_r = (a + b \cdot \ln L_{dp}) \cdot \bar{r}^{a_0} + c, \quad (1)$$

其中,  $N_r$  为受淹路段条数,  $\bar{r}$  为过程降水强度,  $L_{dp}$  为城市排水管道长度. 模型的拟合回归参数分别为:  $a_0 = 2.21$ ,  $a = 0.077$ ,  $b = -0.0087$ ,  $c = -26.47$ .

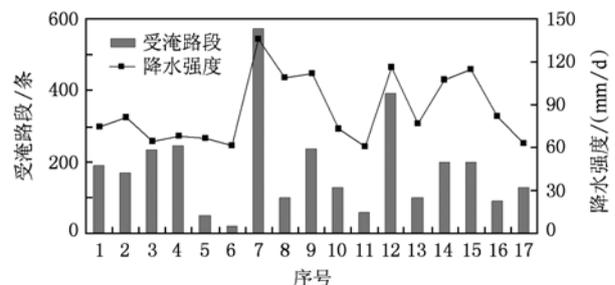


图 3 灾害个例受淹路段条数和降水强度的相关关系

模型模拟值与实际统计值之间的相关关系如图 4 所示,经计算,两者的相关系数为 0.8. 图 4 和

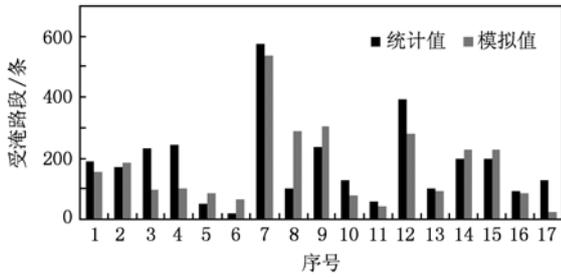


图4 灾害个例受淹路段条数统计值和模拟值的比较

模拟值与实际统计值的相关系数表明,模型对受淹路段条数的模拟有较好的适用性.

参数  $b$  为负值,说明城市排水管道长度对城市道路受涝程度起抑制作用. 由于社会经济的发展,城市排水管道建设不断得以完善,道路的抗涝能力也不断提高. 在此将能否导致道路交通产生经济损失的降水强度临界值定义为致灾降水强度阈值,该阈值可反映社会经济因子的变化导致道路抗涝能力发生明显变化的事实(如图5):上世纪50年代,当降水强度大于 26 mm/d 时城市道路就会出现积水现象;而到了本世纪初,降水强度超过 45 mm/d 时道路才可能产生积水. 上世纪50—80年代城市道路排涝的能力提高不明显,但90年代以后城市排涝能力显著增强,仅10年时间,相应的致灾降水强度阈值就增加了 8.2 mm/d,而到本世纪初抗涝能力甚至达到了能抵御暴雨的水平. 由图5可知,致灾降水强度阈值随时间的变化与城市排水管道的建设紧密相关,该阈值随着排水管道长度的增加而提高,而且其增长趋势同管道长度的趋势保持一致.

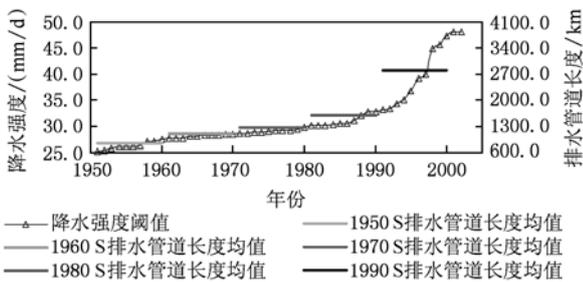


图5 上海逐年致灾降水强度阈值和各年代城市排水管道长度平均值

经研究,可用受淹路段条数和受淹路段平均积水深度构造一个新变量——路段总积深  $H_n$  为

$$H_n = N_r \cdot h_r \quad (2)$$

其中  $N_r$  为受淹路段条数,  $h_r$  为受淹路段平均积水深度.

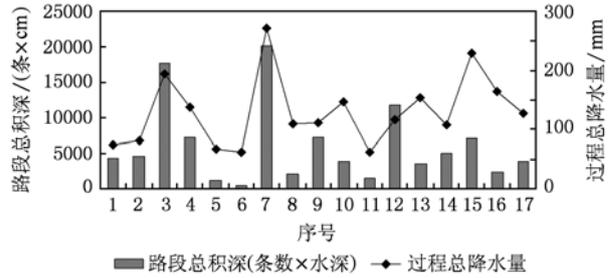


图6 灾害个例路段总积深和过程总降水量的相关关系

路段总积深  $H_n$  可综合考虑受淹路段和路段积水深度这两个受灾因子的变化情况,通过分析,它与过程总降水量  $\sum r$  有很好的相关关系(如图6);而若用过程总降水量的幂函数来拟合  $H_n$ ,可计算出其相关系数为 0.72.

通过分析,可类似地在幂函数的基础上建立总降水量—路段总积深的拟合回归模型

$$H_n = (a + b \cdot \ln L_{dp}) \cdot (\sum r)^{a_0} + c, \quad (3)$$

其中  $H_n$  为路段总积深,  $\sum r$  为过程总降水量,  $L_{dp}$  为城市排水管道长度,模型参数:  $a_0 = 1.51$ ,  $a = 46.0$ ,  $b = -5.36$ ,  $c = -1652.88$ . 经计算,模型模拟值和计算值之间的相关系数达 0.88,该模型对路段总积深的模拟效果较好(如图7).

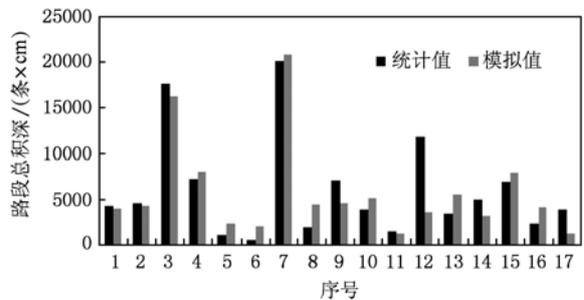


图7 灾害个例路段总积深统计值和模拟值的比较

(1)和(3)式都是通过绘出受灾因子(受淹路段条数和路段总积深)和降水因子(过程降水强度和过程总降水量)的散点图,确定它们之间的函数关系(幂函数关系)后,通过最小二乘法估计模型参数而得. 模型参数综合反映了上海地区城市道路建设水平以及街道地形、地势、坡度等要素,因此,若要将模型推广到其他地区,需对模型参数进行重新估计. 通过建立以上模型,只要已知平均降水强度和过程总降水量,即可估计出受淹路段条数  $N_r$  和道路积水深度  $h_r$ . 类似地,可由(3)式推出包含城市排水管道作用的逐年致灾总降水量阈值(图8),该阈值

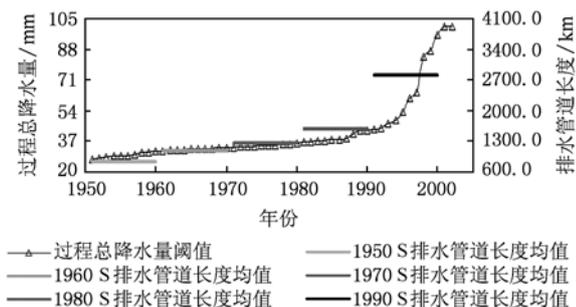


图8 上海逐年致灾降水总量阈值和各年代城市排水管道长度平均值

即为道路因极端降水产生路面积水从而使城市交通产生经济损失的总降水量临界值,它同样可以反映社会经济发展对城市道路抗涝能力的影响.从图8也可看出,上世纪50—80年代道路的抗涝能力提高不明显,而90年代以后阈值迅速上升,本纪初致灾降水总量阈值超过100 mm.

设平均每个路段管道的最大排水能力为  $d_r$  (单位:  $m^3/d$ ), 平均降水强度为  $p$ , 积水路段的平均面积为  $\bar{S}_r$ , 为简化模型, 假设降落到路面上的降水均由排水管道排走, 未能及时排走的降水在路面形成积水, 且道路与周边地区的积水不发生流入、流出现象, 由此可建立  $t$  时刻(从降水开始时刻计时)路面积水总量  $V$  的理想模型

$$V = (N_r \bar{S}_r p - N_r d_r) t = N_r \bar{S}_r h_r, \quad (4)$$

其中  $N_r$  为受淹路段条数,  $h_r$  为道路积水深度. 由(4)式可推出从降水至  $t_1$  时刻道路的积水深度  $h_{r1}$  为

$$h_{r1} = \frac{(\bar{S}_r p - d_r)}{\bar{S}_r} t_1, \quad (5)$$

$\bar{S}_r$  为积水路段的平均面积,  $p$  为平均降水强度,  $d_r$  为路段管道的平均最大排水能力.

同样由(4)式可推导出降水结束后  $t_2$  时刻(从降水开始时刻计时)的道路积水深度  $h_{r2}$  为

$$h_{r2} = h_{r\max} - \frac{d_r}{\bar{S}_r} (t_2 - T_l), \quad (6)$$

$h_{r\max}$  为道路的最大积水深度,  $T_l$  为降水持续时间.

在此假设道路最大积水深度在降水停止时刻出现, 则最大深度积水的排尽时间  $T$  可由道路最大积水量  $V_{\max}$  和最大积水深度  $h_{r\max}$  的表达式求出; 假设积水开始出现时间  $T_b \approx 0$ , 即发生降水发生不久就有积水出现, 可建立积水持续时间  $T_r$  的表达式为

$$T_r = h_{r1} + h_{r2} = \frac{N_r p T_l^2}{N_r p T_l - H n_{\max}}, \quad (7)$$

式中  $T_r$  为积水持续时间,  $h_{r1}$  和  $h_{r2}$  分别为降水过程中  $t_1$  时刻和降水结束后  $t_2$  时刻的道路积水深度,  $N_r$  为受淹路段条数,  $p$  为平均降水强度,  $T_l$  为降水持续时间,  $H n_{\max}$  为降水停止时刻的路段总积深最大值.

因此在已知平均降水强度  $p$ 、过程总降水量  $\Sigma r$  和降水持续时间  $T_l$  的情况下, 可由(1)、(2)和(3)式推算出受淹路段条数  $N_r$  和降水停止时刻的路段总积深最大值  $H n_{\max}$ , 再通过(7)式即可估算出积水持续时间  $T_r$ .

### 3.2. 受淹街道-货币损失模型

现阶段主要运用两种方法对城市道路受涝产生的经济损失进行评估: 用耽搁时间来描述道路受涝对交通造成的影响, 再用替代法计算出耽搁时间内原本能完成的经济产值, 即用本地区的单位时间产值  $\times$  耽搁时间估算道路受涝造成的经济损失; 或估算由于道路积水汽车在路上延长的行驶时间所耗油量和积水对汽车的损耗. 在此主要采用本地区单位时间产值  $\times$  耽搁时间积水对道路的经济影响的估算方法.

耽搁时间与积水深度关系紧密. 一般情况下路面积水超过汽车排气管高度时车辆无法行驶, 考虑到不同车型排气管高度的差异, 首先假设当道路积水超过1 m时任何车辆都无法行驶, 即此时的车流速度为0, 再假设积水深度对车速度的减速作用同该时刻的积水深度成正比, 根据以上假设可建立车速度的表达式为

$$v_r = \begin{cases} (1 - h_r) \cdot v_{r0}, & h_r < 1 \text{ m}, \\ 0, & h_r \geq 1 \text{ m}, \end{cases} \quad (8)$$

其中  $v_{r0}$  为道路无积水情况下车流的平均速度,  $h_r$  为道路积水深度.

分析速度与路程之间的关系式可知, 一段长为  $dL$  的路程, 正常情况下车流通过时间为:  $dt = dL/v_r$ , 但若  $t$  时刻该路段有深度为  $h_r(t)$  的积水, 则车流速度降至  $[1 - h_r(t)]v_{r0}$ , 假设在  $dt$  时间内车流速度保持不变, 若此时积水深度小于1 m, 则可由上述关系推导出通过该积水路段的车流被耽搁的时间

$$T_d = \int_0^t \frac{h_r(t)}{1 - h_r(t)} dt, \quad (9)$$

其中  $T_d$  为时间  $t$  内通过积水路段的车流被耽搁的时间,  $h_r(t)$  为  $t$  时刻道路积水深度. 由(9)式可推出降水至  $t_1$  时刻, 道路积水使交通耽搁的时间  $T_{d1}$  的表达式

$$T_{d1} = \int_0^{t_1} \frac{\frac{Hn_{max}t}{N_r T_l}}{1 - \frac{Hn_{max}t}{N_r T_l}} dt, \quad (10)$$

其中  $Hn_{max}$  为降水停止时刻的路段总积深最大值,  $N_r$  为受淹路段条数,  $T_l$  为降水持续时间. 类似地, 降水结束而积水未排尽的  $t_2$  时刻, 积水使交通耽搁的时间  $T_{d2}$  为

$$T_{d2} = \int_0^{t_2} \frac{\frac{Hn_{max}}{N_r} \cdot \frac{T_l + t}{T_l} - pt}{1 - \frac{Hn_{max}}{N_r} \cdot \frac{T_l + t}{T_l} + pt} dt, \quad (11)$$

其中  $p$  为平均降水强度. 若在时段  $[T_1, T_2]$  内积水深度  $h_r \geq 1$  m, 则可通过改变(10)和(11)式的积分上下限求出交通总耽搁时间  $T_{d0}$

$$\begin{cases} T_{d0} = T_{d1} + T_{d2} + N_r(T_2 - T_1), \\ T_{d1} = \left( \frac{N_r}{Hn_{max}} \ln \left| \frac{N_r}{N_r - Hn_{max}} \right| - 1 \right) T_1, \\ T_{d2} = \frac{1}{Hn_{max} - N_r T_l p} \left[ Hn_{max} - N_r T_l p (T_2 - T_1), \right. \\ \left. + N_r T_l \ln \left| \frac{N_r T_l p (N_r T_l - Hn_{max} T_l - 2Hn_{max} T_2 + N_r T_l T_2 p) + Hn_{max} (Hn_{max} T_l + Hn_{max} T_2 - N_r T_l)}{N_r T_l^2 p (N_r - 2Hn_{max} + N_r T_l p) + Hn_{max} T_l (Hn_{max} - N_r)} \right| \right], \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $N_r$  为受淹路段条数  $Hn_{max}$  为降水停止时刻路段总积深的最大值,  $T_l$  为降水持续时间,  $p$  为平均降水强度,  $T_1$  为降水过程中道路积水深度达到 1 m 的时刻,  $T_2$  为降水结束后道路积水下降至 1 m 的时刻.

若道路积水深度  $h_r$  始终小于 1 m, 则可令  $T_l = T_1 = T_2$ , 代入(12)式即可求出总耽搁时间  $T_{d0}$ . 因此通过求算积水持续时间  $T_r$ ,  $Hn_{max}$  和受淹路段条数  $N_r$ , 可进一步求出耽搁时间  $T_{d0}$ .

由前面分析可知, 耽搁时间与当地单位时间产值相乘可估算出极端降水对交通造成的经济损失, 由此可建立总耽搁时间与交通损失  $Y_{tr}$  之间的关系式

$$Y_{tr} = U_p \cdot \frac{N_r}{SN_R} \cdot T_{d0}, \quad (13)$$

其中,  $U_p$  为当地单位时间产值,  $N_r$  为受淹路段条数,  $SN_R$  为城市主要路段条数,  $N_r / SN_R$  为路段受淹率.

#### 4. 个例分析

以 1991 年 8 月 7—8 日上海市区遭受暴雨袭击导致城区道路积水所带来的经济损失为例, 检验所建模型的适用性.

1991 年 8 月 7—8 日上海全市范围普降雷暴雨

和大暴雨, 局部地区特大暴雨, 两日平均降水强度为 136.2 mm, 平均过程总降水量为 272.3 mm. 而 1991 年上海市区排水管道长度为 1942 km. 将两日平均降水强度、过程降水总量和排水管道长度代入极端降水-受淹道路模型中, 由此得估算出道路平均积水深度和受淹路段条数分别为 40.7 cm 和 559 条, 这与灾情记录——积水 30—40 cm 和受淹 574 条马路在数值上很接近, 两个变量模拟值和统计值的相对误差仅为 2.6% 和 16.3% 左右. 由道路积水深度和路段总积深的估计值以及降水数据, 可推算出积水持续时间为 2.35 日, 其中降水结束后积水排尽所需时间为 8.43 h. 进一步可由(12)式求算出道路积水使交通总耽搁的时间为 69.66 h. 1991 年上海单位时间国民生产总值为 942.66 万元/小时, 街道条数约为 2 万条, 因此本次暴雨过程导致市区道路的受淹率为 26.4‰, 道路积水导致交通堵塞所造成的经济损失金额约为 24.89 万元.

#### 5. 极端降水的新定义

用阈值法定义极端降水, 其降水阈值的选取目前常用两种方法: 固定阈值法和百分位阈值法. 百分位阈值主要反映了变量的概率统计特征, 阈值随变量统计特征的变化而发生改变<sup>[32-35]</sup>. 对于引发灾害的极端降水来说, 触发灾害的降水阈值与受灾体

自身的抗灾能力紧密相关,而与致灾因子的概率统计性质相关性较小,因而用百分位阈值描述引发灾害的极端降水阈值并不适合.

引发受灾体发生质变并产生经济损失的降水阈值在一定时期和条件下基本保持不变或处在一个有限的变化范围内,所以在外界能对受灾体性质产生影响的因子未发生明显变化的情况下,极端降水的致灾阈值可用固定阈值定义.但外界影响因子随时间发生变化从而对受灾体的抗灾性质造成影响时,受灾体所对应的降水致灾阈值将发生改变,此时前一时期的降水固定阈值就不再适用,这里可用承灾性衡量受灾体能承受程度多大的灾害才会发生质变从而产生经济损失的自身特性.由此可知,固定阈值在受灾体自身性质不变的情况下适用性较好,但要充分考虑其承灾性随时间和社会经济发展而发生变化的情况.

上文研究表明,极端降水的承灾性在一定程度上受到某些社会经济因子的影响,而极端降水致灾阈值又与受灾体承灾性密切相关,因此极端降水的致灾阈值会随着这些因子的变化而发生改变.由此可以通过社会影响因子的发展来描述极端降水阈值的变化情况.

经由(1)和(3)式可推导出用排水管道长度的指数函数来描述极端降水对上海地区交通的致灾阈值  $p_{u1}$  和过程总降水量阈值  $p_{u2}$

$$p_{u1} = \left( \frac{a_1}{b_1 - \ln L_{dp}} \right)^{c_1}, \quad (14)$$

$$p_{u2} = \left( \frac{a_2}{b_2 - \ln L_{dp}} \right)^{c_2}, \quad (15)$$

$L_{dp}$  为上海地区某一年份的城市排水管道长度,  $a_1 = 3042.53$ ,  $b_1 = 8.85$ ,  $c_1 = 0.45$ ,  $a_2 = 308.37$ ,  $b_2 = 8.58$ ,  $c_2 = 0.66$ .

结合表1,从图4和图6看出,1991年8月7—8日以及1995年6月24—25日(图4,图6中序号为7和12的个例)这两次极端降水过程都造成了非常严重的道路积水.通过分析这两次过程的降水,发现严重的灾情与过程降水强度有直接关系,两次过程的平均降水强度分别为136.2 mm/d和116.3 mm/d,均达到大暴雨水平,而降水强度也可检验城市排水设施应对瞬时大流量的排水能力,因此将降水强度作为衡量对城市交通造成威胁的极端降水的变量较合理.而1985年8月31—9月3日(图4,图6中序号为3的个例)的持续性强降水过程的降

水强度仅为64.7 mm/d,但其历时4 d,持续时间较长,过程总降水量达235 mm,最终该过程也造成了许多街道严重积水的情况.由此看出,极端降水过程不仅在降水的强度上对城市道路交通产生影响,降水持续时间也与道路积水有很大关系.而过程总雨量能衡量出城市排水系统的持续排水能力,因此降水总量同样应该作为表征降水极端程度的变量.因此在考虑极端降水阈值时,必须把降水强度阈值同降水总量阈值综合考虑,只要降水强度或降水总量超过相应的阈值,街道就可能产生积水而造成城市交通运输的经济损失.

可将极端降水定义为降水强度或总量超过一定阈值的降水过程,这个极端降水阈值在一定时期内是一定值,但从长时期来看,它受到某些社会经济因子的影响并随时间发生变化,由此可将对城市交通造成影响的极端降水定义为:降水强度或总量大于致灾降水阈值的短时强降水或持续数日的连续性降水,其中各年份致灾降水强度阈值和过程总降水量阈值与当年的城市排水管道长度呈指数关系,在上海地区降水强度和总降水量致灾阈值的多年平均值分别为31.3 mm/d和42.0 mm.

以上定义的阈值有两大特点:1)短期是相对稳定的固定阈值,2)长期受社会经济因子影响而随外界影响因子发生变化.因此以上定义的极端降水阈值可称为“随影响因子变化的固定阈值”.用该定义方法确定的致灾降水阈值不仅能反映一段时间内城市道路交通抗涝能力的相对稳定性,还反映了社会经济因子对道路交通抗涝能力的推动作用,即外在条件对道路交通承灾性和抗涝性质的长期影响.与传统的两种极端降水阈值(固定阈值和百分位阈值)选取方法相比,这种阈值定义方法能综合考虑受灾体本身的性质和外界因子对它的作用,更能反映极端降水这一原本仅仅是统计意义上的天气过程对人类社会造成的经济影响,使其具备一定的社会经济意义,因此更适用于社会具体行业部门(上文所建模型适用于城市交通部门)受灾损失的评估工作.

## 6. 结论与讨论

通过探讨极端降水和城市道路交通经济损失之间的关系,首先确定灾害损失函数曲线,接着结合城市道路积水排尽时间理论模型、道路积水与车

流速率的理论模型以及经济损失评估模型等建立一个极端降水对道路交通造成经济损失的估算模型,并在模型中引入城市排水管长度作为社会经济影响因子.

该模型有以下几个优点:模型所需输入变量少,计算简便,适用于城市道路涝灾的经济损失快速评估;该模型既能充分考虑大部分物理过程对受灾体的影响,又对一些难于描述的复杂过程加以了简化.通过对上海市一次暴雨袭击造成交通道路损失的个例模拟检验发现,道路平均积水深度和受淹路段条数的模拟值和统计值的相对误差仅为 2.6% 和 16.3% 左右,进一步验证了上述所建模型的实用性.

从经济学和灾害学的角度出发,对极端降水进行了重新定义,提出了“随影响因子变化的固定阈值”的概念.用该定义方法确定的道路受灾阈值能综合考虑受灾体本身性质和外界因子对它的作用,具备一定的社会经济特性,适用于社会具体行业部

门受灾损失的评估工作.

考虑到逐时降水数据只有部分站点的资料,而且数据长度有限,因此本文选用逐日降水数据进行分析和建模工作.此外,由于目前国内对外公开的灾害直接经济损失、灾害间接影响等统计数据,尤其是城市道路受灾数据的收集难度较大;社会经济数据在不同地区统计的变量和单位存在较多的一致等问题,因此本文仅选取一组数据质量相对较好的经济影响因子引入模型当中进行模拟研究.

目前城市给排水研究是一项涉及多学科交叉的复杂课题,以上模型建模和确定致灾降水阈值等工作仅仅是对特定地区所做的试探性研究,今后在加强与城市规划、道路交通管理部门合作、收集更多可用数据的基础上,可进一步细化对主要受灾过程的模拟,考虑更多地形和社会经济因子对城市道路承灾能力的影响,从而进一步提高模型对洪涝灾害的模拟能力.

- [1] National Bureau of Statistics of China, Ministry of Civil Affairs of the People's Republic of China 1995 Report of the Damage Caused by Disaster in China, 1949—1995 (Beijing: China Statistics Press) (in Chinese) [国家统计局、民政部 1995 中国灾情报告:1949—1995. (北京:中国统计出版社)]
- [2] Hu A G 1998 *Environmental Protection* **10** 4 (in Chinese) [胡鞍钢 1998 环境保护 **10** 4]
- [3] Wang X C 2008 *Risk Analysis and Insurance Adaptive Mechanism of Extreme Climate Events over China* (Beijing: China Meteorological Press) p1—13 (in Chinese) [王雪臣 2008 中国极端气候事件的风险分析及保险适应机制研究 (北京:气象出版社) 第 1—13 页]
- [4] Ouellete P, El-Jabir N, ASCE M, Rousselle J 1985 *Journal of Water Resources Planning and Management* **111** 467
- [5] Jin J L, Wei Y M, Yang X H 1997 *Journal of Catastrophology* **13** 6 (in Chinese) [金菊良、魏一鸣、杨晓华 1997 灾害学 **13** 6]
- [6] Liu X L 2005 *The Theory and Application of Regional Flood Risk Assessment* (Beijing: Peking University Press) (in Chinese) [刘新立 2005 区域水灾风险评估的理论与实践 (北京:北京大学出版社)]
- [7] Lv C L, Chen S H 1993 *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* **16** 67 (in Chinese) [吕纯濂、陈舜华 1993 南京气象学院学报 **16** 67]
- [8] Wang S R, Yang X, Da Q L, Han Y 2000 *Acta Geographica Sinica* **s1** 163 (in Chinese) [王守荣、杨昕、达庆利、韩勇 2000 地理学报 **s1** 163]
- [9] Wu J Y, Han W X, Xu Y, Zhou N S 1998 *Systems Engineering—Theory and Practice* **11** 53 (in Chinese) [武靖源、韩文秀、徐杨、周年生 1998 系统工程理论与实践 **11** 53]
- [10] Li C Q, Hou G B 2010 *Water Resources and Hydropower Engineering* **3** 89 (in Chinese) [李传奇、侯贵兵 2010 水利水电技术 **3** 89]
- [11] Wen L D, Fan B X, Xu X F, Wei M J 1998 *Hydrology* **1** 22 (in Chinese) [文立道、范本贤、徐晓峰、韦明杰 1998 水文 **1** 22]
- [12] Zhang L 1995 *Geographical Research* **3** 110 (in Chinese) [张犁 1995 地理研究 **3** 110]
- [13] Cen G P, Shen J, Fan R S 1996 *Journal of Xi'an University of Technology* **3** 184 (in Chinese) [岑国平、沈晋、范荣生 1996 西安理工大学学报 **3** 184]
- [14] Liu Z H, Liu G F, Chou L 2009 *Journal of Economics of Water Resources* **1** 41 (in Chinese) [刘朝辉、刘高峰、仇蕾 2009 水利经济 **1** 41]
- [15] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, Knight R W, Jamason P F, Hennessy K J, Suppiah R, Page C M, Wibig J, Fortuniak K, Razuvaev V N, Douglas A, Førland E, Zhai P M 1999 *Climatic Change* **42** 243
- [16] Zhang D Q, Qian Z H 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 4634 (in Chinese) [章大全、钱忠华 2008 物理学报 **57** 4634]
- [17] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **12** 1076
- [18] Yan Z W, Yang C 2000 *Climatic and Environmental Research* **5** 267 (in Chinese) [严中伟、杨赤 2000 气候与环境研究 **5** 267]

- [19] Zhai P M, Ren F M, Zhang Q 1999 *Acta Meteorologica Sinica* **57** 208 (in Chinese) [翟盘茂、任福民、张强 1999 气象学报 **57** 208]
- [20] Jiang Z H, Ding Y G, Chen W L 2007 *Advances in Climate Change Research* **3** 202 (in Chinese) [江志红、丁裕国、陈威霖 2007 气候变化研究进展 **3** 202]
- [21] Hou W, Yang P, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3932 (in Chinese) [侯威、杨萍、封国林 2008 物理学报 **57** 3932]
- [22] Gong Z Q, Wang X J, Zhi R, Feng G L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4342 (in Chinese) [龚志强、王晓娟、支蓉、封国林 2009 物理学报 **58** 4342]
- [23] Cai M, Ding Y G, Jiang Z H 2007 *Plateau Meteorology* **26** 309 (in Chinese) [蔡敏、丁裕国、江志红 2007 高原气象 **26** 309]
- [24] Yang P, Hou W, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5333 (in Chinese) [杨萍、侯威、封国林 2008 物理学报 **57** 5333]
- [25] Ding Y G, Liu J F, Zhang Y C 2004 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* **23** 770 (in Chinese) [丁裕国、刘吉峰、张耀存 2004 大气科学 **23** 770]
- [26] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Nonlinear theories and methods on spatial-temporal distribution of the observational data* (Beijing: Metrological press) (in Chinese) [封国林、董文杰、龚志强、侯威、万仕全、支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 气象出版社]
- [27] Feng G L, Wang Q G, Hou W, Gong Z Q, Zhi R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2853 (in Chinese) [封国林、王启光、侯威、龚志强、支蓉 2009 物理学报 **58** 2853]
- [28] Feng G L, Dong W J, Jia X J, Cao H X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1181 (in Chinese) [封国林、董文杰、贾晓静、曹鸿兴 2002 物理学报 **51** 1181]
- [29] Feng G L, Dai X G, Wang A H, Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 4 606 (in Chinese) [封国林、戴新刚、王爱慧、丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [30] Shanghai Municipal Statistics Bureau 2009 *Shanghai Statistical Yearbook 2009* (Beijing: China Statistics Press) (in Chinese) [上海市统计局 2009 上海统计年鉴 2009 (北京: 中国统计出版社)]
- [31] Wen K G 2006 *Chinese Climate Ceremony (Volume of Shanghai)* (Beijing: China Meteorological Press) (in Chinese) [温克刚 2006 中国气象灾害大典·上海卷 (北京: 气象出版社)]
- [32] Bonsal B R, Zhang X B, Vincent L A 2001 *J. Climate* **5** 1959
- [33] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745
- [34] Feng G L, Gao X Q, Dong W J, Li J P 2008 *Chaos Solitons and Fractal* **37** 487
- [35] Zhang D Q, Feng G L, Hu J G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 736

# Brief research on economic impact assessment model for Shanghai urban transportation under durative extreme precipitation\*

Huang Yan<sup>1)2)</sup> Dong Wen-Jie<sup>3)</sup> Zhi Rong<sup>4)</sup> Gong Zhi-Qiang<sup>4)†</sup>

1) (*Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*College of Global Change and Earth System, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

4) (*Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*)

(Received 27 July 2010; revised manuscript received 10 August 2010)

## Abstract

Estimation models of economic losses due to flood are established by combining drainage times of urban road waterlogging-theoretical models and economic loss assessment models, etc. And then the “loss” curves are determined by discussing the relationships between daily mean precipitation and economic losses of urban transportation departments. Some socioeconomic variables, which are closely related to the anti-flood capability of urban transportation departments, are adopted in the models in this paper. By model testing, the economic loss assessment model established in this paper shows good simulation performance and applicability. And it has simple computation, needs few input variables, and is suited for the rapid assessment of the economic loss of some region. Based on the models established in this paper, the thresholds of the precipitation intensity and the total storm precipitation of each year in Shanghai are calculated. And a new definition of extreme precipitation, called “fixed thresholds varying with the influence factors”, is given. This definition underlines the socioeconomic character of extreme precipitation which would cause economic loss and possesses high social practical values compared with other definitions of extreme precipitation.

**Keywords:** extreme precipitation, extreme precipitation-economic loss model, thresholds

**PACS:** 92.60.Wc

---

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40930952, 40875040, 40775048), the Special project for Public Welfare Enterprises (Grant Nos. GYHY200806005) and the National Science/Technology Support Program of China (Grant Nos. 2007BAC29B01).

† Corresponding author; E-mail: gzq0929@126.com