

周洪建, 汪明, 胡心佳, 等. 年度洪涝灾害风险评估模型及其应用——以湖南为例[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 122–127.  
[ZHOU Hongjian, WANG Ming, HU Xinjia, et al. Annual flood disaster risk assessment model and its application[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 122–127. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.023.]

# 年度洪涝灾害风险评估模型及其应用

——以湖南为例\*

周洪建<sup>1</sup>, 汪 明<sup>2</sup>, 胡心佳<sup>2</sup>, 袁 艺<sup>1</sup>

(1. 应急管理部国家减灾中心, 北京 100124; 2. 北京师范大学 减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

**摘 要:** 依据灾害概率风险评估理论, 考虑汛期降水的可预报性, 基于历史洪涝灾害事件, 尝试性地构建了年度洪涝灾害风险评估模型, 以湖南为例, 对评估模型进行了检验与应用。结果表明: 模型建立了前期海温和环流指数等因子与汛期区域降水时空分布的回归预报方程, 应用概率风险分析得到年度不同降水下直接经济损失分布, 结合蒙特卡洛仿真模拟求解损失的超越概率曲线, 评估年度洪涝灾害单次最大可能损失、年度总损失以及年期期望损失; 模型集“未来年度汛期降水预测”、“降水与损失分布关系拟合”、“损失超越概率评估”于一体, 是对全过程年度洪涝灾害风险评估方法的新探索; 湖南年度洪涝灾害评估案例表明该模型可操作, 结果与实际情况相符。研究可为完善灾害风险评估内容与技术方法提供新视角, 亦可为开展业务实践提供方法借鉴。

**关键词:** 年度风险; 洪涝灾害; 风险评估模型; 概率风险; 湖南

**中图分类号:** X43; P954; P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2019)01-0122-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.023

洪涝灾害是一种突发性强、发生频率高、危害严重的自然灾害, 而中国是世界上洪涝灾害最为严重的国家之一<sup>[1]</sup>。洪涝灾害风险评估是对区域洪水灾害自然属性和社会属性的综合评价, 其目的是为了更精确掌握洪灾风险的空间格局及内在规律<sup>[2]</sup>。年度自然灾害风险评估是对未来一年某区域灾害风险的分析与评价, 可为做好年度防灾减灾救灾工作以及重要基础设施的规划施工等提供重要依据。中国地震部门每年年初会分析判断未来一年区域可能发生破坏性地震的地区及震级强度<sup>[3]</sup>, 气象部门年初发布未来一年气候趋势预测意见并给出气候风险指数预测数据<sup>[4]</sup>, 国土资源部门年初也会对未来一年的地质灾害趋势做出预测<sup>[5]</sup>。不难发现, 这些都是针对致灾因子发生概率的预测, 并不是真正的未来一年的灾害风险评估, 国内外尚未出现较为系统的年度自然风险评估的相关做法与研究成果。鉴于此, 本文从灾害概率风险评估理论<sup>[6]</sup>出发, 以湖南省为例, 构建年度洪涝灾害风险评估模型, 探索年度灾害风险评估的新途径, 以期为提升区域年度洪涝灾害风险防范和备灾工作的科学性和针对性提供参考。

## 1 年度洪涝灾害风险评估模型

### 1.1 评估思路

洪涝灾害与极端降水关系密切<sup>[7]</sup>, 对极端降水发

生趋势进行分析判断, 结合承灾体脆弱性开展年度风险评估, 是本文年度洪涝灾害风险评估的基本思路。

有研究指出, 海温异常是触发气候异常的重要因子<sup>[8]</sup>, 海洋有较强的记忆性和持续性, 海温变化往往超前于大气环流和天气气候变化, 前期海温异常是短期气候预测的重要前期信号<sup>[9]</sup>。灾害风险是危险性与易损性的乘积, 即风险(年期期望损失) = 致灾频率(洪涝发生次数的频率) × 易损性(超越概率), 其中致灾频率反映了区域内发生不同程度洪涝灾害的可能性; 易损性则反映洪涝灾害的损失分布, 即超过某一损失程度的概率, 易损性表现为一条或多条损失的超越概率曲线。

除了对年期期望损失评估之外, 也需要预测未来发生洪涝灾害的趋势及损失概率, 这需要大量的随机数来源。本文利用蒙特卡洛仿真模拟<sup>[10-11]</sup>得到大量目标变量, 弥补历史数据不足的缺陷, 并结合利用历史数据得到的损失和洪涝灾害次数的分布, 绘制出洪涝灾害损失的累积超越概率和单次最大超越概率曲线, 并计算年期期望损失, 即: 年度洪涝灾害风险。

### 1.2 评估流程

以汛期降水的时空分布作为切入点, 分析造成降水异常的物理机制, 探寻可预报因子海温及环流指数的长期预报性; 结合研究区历史洪涝灾害损失数据, 对不同降水情景下洪涝灾害的频次及直接经济损失的

\* 收稿日期: 2018-06-21

修回日期: 2018-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目“年度洪涝灾害年度风险评估方法与综合防范模式研究”(41771541)

第一作者简介: 周洪建(1980-), 男, 山东泰安人, 副研究员, 博士, 主要从事灾害风险与损失评估研究。

E-mail: zhouhj\_bnu@hotmail.com

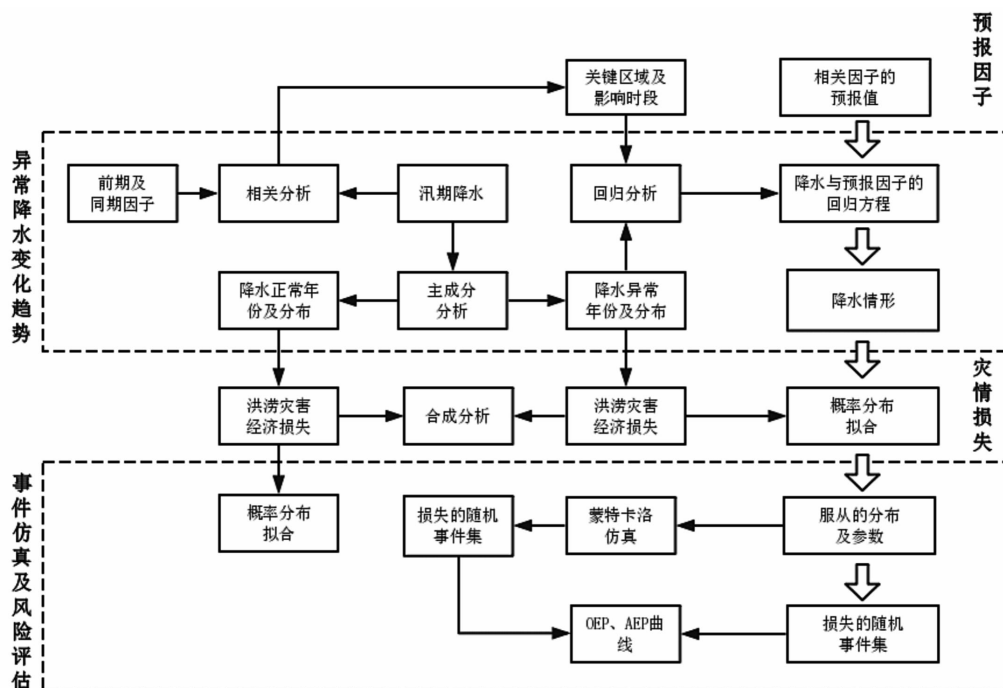


图1 年度洪涝灾害风险评估流程

概率分布进行拟合, 并利用蒙特卡洛仿真生成损失事件集, 计算损失的超越概率; 将降水作为中间桥梁, 建立可预报因子与洪涝灾害损失间的定量关系, 对年度内的洪涝灾害损失进行评估(图1)。

### 1.3 评估方法

#### 1.3.1 区域降水时空分布特征分析

中国洪涝灾害主要发生在汛期, 为探寻汛期降水的时空分布特征, 并依据每年汛期的降水情况挑出降水异常年份, 从时间和空间两个角度分析研究区汛期降水的变化趋势。本文采用经验正交函数分析方法(EOF, Empirical Orthogonal Function), 将气象场中时间和空间的变化分离, 主成分(PC)对应的是时间变化(也称时间系数), 特征向量对应的是空间样本(也称为空间特征向量或者空间模态), 根据不同的模态对降水分布进行分型<sup>[12]</sup>。

#### 1.3.2 确定前期海温等信号的分布区域及影响时段

采用不同区域、不同季节的全球海温场、500hPa高度场和全球海平面气压场, 通过相关分析筛选预测因子, 用逐步回归分析建立降水场与各气候因子场的关系。由于预测因子数量很大, 用于建立回归方程的因子是通过对该预测量与预测因子进行相关分析筛选得到的。

#### 1.3.3 逐步回归法预报未来年度的降水情形

利用气候主分量逐步回归模型, 在众多因子中挑选变量, 以降水场的主分量作为因子, 建立其与海温、海平面气压场等多个因子场之间的关系, 经过逐步回归双重筛选, 建立最优回归方程, 实现降水的预测, 并进行回报与预测试验。本研究利用Matlab中的Stepwise函数进行逐步回归预报。

#### 1.3.4 降水预测值的检验

逐步回归方程中, 预报量是研究区降水的主成分(PC)值, 对于预报准确性的检验, 采用交叉验证法、PC值还原为降水距平百分率等2种方式进行。前者是在给定的建模样本中, 拿出大部分样本进行建模型, 留小部分样本用刚建立的模型

进行预报, 并求这小部分样本的预报误差, 记录它们的平方加和; 如果预报误差较小, 说明预报的效果好。后者是对降水距平百分率矩阵( $X$ )进行计算, 得到EOF和主成分(PC), 由于特征向量矩阵的近似不变性, 当完成对主分量矩阵的预测后, 可利用EOF和PC这两个矩阵做回算, 完全恢复原来的数据矩阵 $X$ , 利用前面最突出的几个EOF模态可拟合出矩阵 $X$ 的主要特征。

#### 1.3.5 不同降水情形下的蒙特卡洛仿真及风险评估

做蒙特卡洛仿真是为进行洪涝灾害风险评价, 即: 对风险大小可能出现的概率进行评价, 得到这些风险发生的概率以及可能导致的直接经济损失。具体步骤如下: ①利用PC值的大小, 挑出PC异常高/低(绝对值大于0.5个标准差)的年份作为降水异常年, 其余年份为降水正常年; 将样本根据降水情形多雨年份、正常年份和少雨年份等三类; ②统计三类样本下, 年度洪涝灾害发生的次数, 并利用Matlab中dfittool工具得到洪涝灾害次数的分布类型及参数; ③根据洪涝灾害次数的分布类型及参数, 每组分别生成1000个随机数, 得到不同降水情形下1000年(假设)洪涝灾害发生次数; ④将三类的洪涝灾害直接经济损失值进行对数化处理, 拟合出累积分布函数, 得到分布形态及参数; ⑤结合第3步中得到的1000年(假设)逐年洪涝灾害发生次数, 每一年分别生成若干个(洪涝灾害发生次数)满足0~1均匀分布的随机数, 利用直接经济损失的累积分布函数曲线, 找出其所对应的直接经济损失值, 可得到每一年的洪涝灾害直接经济损失情况; ⑥统计三种情形下每一年直接经济损失值中的最大值, 各得到1000个数, 描绘超越概率曲线, 得到最大损失超越概率(OEP)曲线; 同理可得到累计损失超越概率(AEP)曲线; ⑦期望损失, 即由超越概率曲线、 $x$ 轴和 $y$ 轴围成的面积, 分为年期期望损失和次年期期望损失。

表 1 湖南省年度洪涝灾害风险评估案例数据及来源

序号	名称	年份	来源
1	湖南省 34 个气象台站逐日降水量数据	1970 - 2013 年	国家气象科学数据共享服务平台、湖南省气象局
2	全球海温数据	1969 - 2013 年	国家气候中心的海温指数, 英国 Hadley 中心 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 海表温度(SST)资料
3	500hPa 高度场数据	1969 - 2013 年	国家气候中心发布的 74 项环流指标
4	海平面气压数据	1969 - 2013 年	美国环境预报中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)联合推出的再分析数据集
5	洪涝灾害次数与直接经济损失数据	1970 - 2013 年	中国气象灾害大典(湖南卷)、民政部自然灾害数据库(洪涝灾害数据库)

## 2 湖南实例应用

### 2.1 研究区及数据来源

湖南地处长江中游, 洪涝灾害频发。根据 1984 - 2007 年资料统计, 湖南洪涝灾害年内分布极不均匀, 主要集中在 5 - 9 月, 占总损失的 80% 以上; 从各县暴雨洪涝灾害损失的时空分布来看, 湘北主要集中在 6 - 7 月, 而湘中南则主要集中在 7 - 8 月<sup>[13]</sup>。另据民政部统计, 2000 - 2016 年, 湖南省洪涝灾害年均造成 1 147.3 万人受灾, 77 人死亡(失踪), 63.7 万人紧急转移安置, 农作物受灾面积 849.1 km<sup>2</sup>, 绝收面积 126.1 km<sup>2</sup>, 年均倒塌房屋 8.1 万间, 直接经济损失 100.6 亿元; 年度间洪涝灾害损失波动大, 2000 - 2016 年间, 受灾人口最少为 2000 年的 474 万人次、最多则为 2002 年 1 937 万人次, 年倒塌房屋数量最少为 2013 年的 1.3 万间, 最多则为 2002 年的 29.9 万。本文中所用数据及来源如表 1 所示。

### 2.2 湖南汛期降水时空分布特征

对 EOF 分解的结果进行筛选, 第一模态对总方差的贡献达 48.9%, 第二模态的贡献达 23.7%, 前两模态的累积方差贡献超过 70%, 可选择这两个模态代表湖南汛期降水的时空分布情况。第一模态是反映湖南降水变化关系最主要分布场, EOF1 均为正值, 表现为全省一致涝或一致旱; EOF2 大体上以双峰、南岳一线为界, 存在明显的南北反相位关系, 代表了第二种降水分布——南涝(旱)北旱(涝)型。以 0.5 倍标准差为分界, 时间系数(PC)的绝对值大于 0.5 倍标准差的年份, 定为降水异常年(图 2)。

### 2.3 湖南汛期降水逐步回归预报与验证

#### 2.3.1 寻找备选回归因子

将代表湖南汛期降水逐年变化的时间系数(PC)与全球前一年秋季、冬季, 同一年春季、夏季的全球海温作相关分析, 发现前一年秋、冬赤道太平洋附近的海域与 PC1、PC2 有较强的相关性(图 3 为与 PC1 的相关分析结果, PC2 结果文中未列出)。将关键海域秋、冬季的海温分别作 EOF 分解, 得到的主分量作为待选的回归因子。此外, 将 nino3.4 指数、nino1 + 2 区、nino3 区指数等海温指数也作为备选因子。将全球海温数据划分三个区域, 其中, 1 区为 20 ~ 50°S, 2 区为 15°S ~ 15°N, 3 区为 20° ~ 50°N, 对三个区域内的逐月海平面气压进行 EOF 分析, 取前 15 个主分量, 分别与 PC1、PC2 作相关分析, 通过显著性检验的作为

备选的因子。

#### 2.3.2 建立回归预报方程

在普查影响湖南汛期降水因子的基础上, 设定显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 建立预测湖南汛期降水距平分布的回归预测方程, 并进行回报和预测试验。对湖南省汛期降水场的前 2 个主分量, 利用相关分析筛选得到的高相关因子, 进行双重检验逐步回归计算。对于湖南汛期降水第 1 主分量的双重检验逐步回归预测方程如下:

$$Y = 0.00512048 - 0.196312 \times X_1 - 0.360486 \times X_2 - 0.26554 \times X_3 - 0.351958 \times X_4 + 0.22569 \times X_5 + 0.202925 \times X_6 - 0.884564 \times X_7 + 0.56751 \times X_8 - 0.27136 \times X_9 + 0.626504 \times X_{10} \quad (1)$$

式中:  $Y$  是第一主分量(PC1),  $X_1$  是前一年 2 月的 PNA 指数,  $X_2$  是同一年 5 月的 NAO 指数,  $X_3$  是同期 4 月关键海域上空 500 hPa 高度场值,  $X_4$  是前期 8 月关键海域上空 500 hPa 高度场值,  $X_5$  是 1 区同一年 3 月海平面气压作 EOF 分解后第 9 模态的值,  $X_6$  是 1 区同一年 1 月海平面气压作 EOF 分解后第 3 模态的值,  $X_7$  是同期 2 月的 SCA 指数,  $X_8$  是同期 9 月的 Niño a 区指数,  $X_9$  是 2 区前一年 12 月海平面气压作 EOF 分解后第 5 模态的值,  $X_{10}$  是同期 6 月的 WP 指数。回归曲线与原曲线的相关性达到 0.9 以上(图 4)。

类似地, 对湖南汛期降水第 2 主分量的双重检验逐步回归预测方程如下:

$$Y' = -0.0776793 - 0.220514 \times X'_1 - 0.266865 \times X'_2 + 0.34852 \times X'_3 + 0.271487 \times X'_4 - 1.18223 \times X'_5 - 0.937665 \times X'_6 - 0.200113 \times X'_7 \quad (2)$$

式中:  $Y'$  是第二主分量(PC2),  $X'_1$  是前一年 12 月的 Niño 1 + 2 区海温指数,  $X'_2$  是 1 区同一年 1 月海平面气压作 EOF 分解后第 11 模态的值,  $X'_3$  是 1 区同一年 1 月海平面气压作 EOF 分解后第 12 模态的值,  $X'_4$  是 2 区同一年 5 月海平面气压作 EOF 分解后第 3 模态的值,  $X'_5$  是同一年 2 月的 EA 指数,  $X'_6$  是同一年 5 月的 NAO 指数,  $X'_7$  是同一年 2 月关键海域上空 500 hPa 高度场值。回归曲线与原曲线的相关性达到 0.82 以上(图 4)。

#### 2.3.3 降水预测的检验

通过交叉验证、回算降水距平百分率等两种方法, 对预报效果进行检验。图 4 是利用交叉验证法, 对 PC 值进行回报检验, 说明了回归方程的预报效果很好。通过回算降水距平百分率的方法, 挑选降水较为异常的 2002、2011 年进行验证分析, 2002 年湖南东北部地区降水偏多的成数较多, 预报的结果与实际结果较为一致(图 5); 2011 年是全

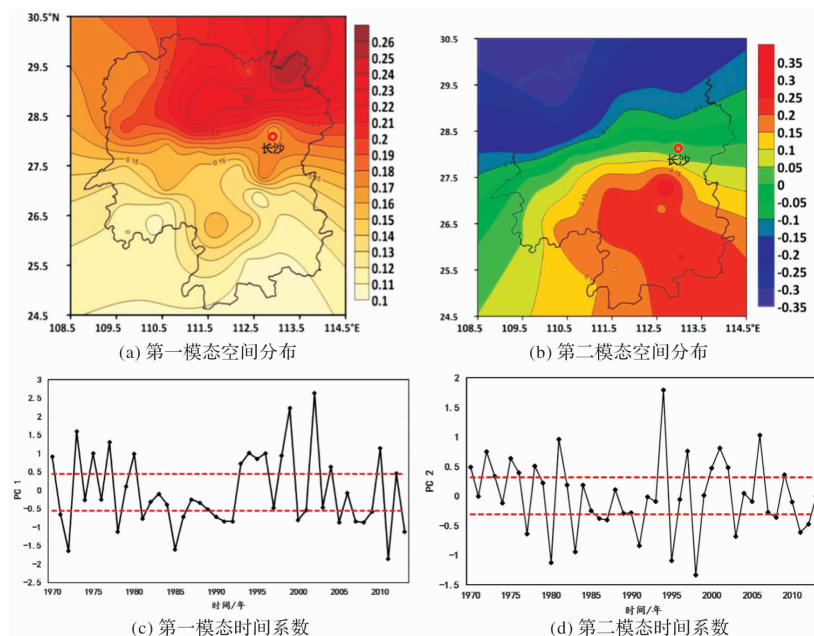


图2 湖南汛期降水时空分布特征(EOF结果)

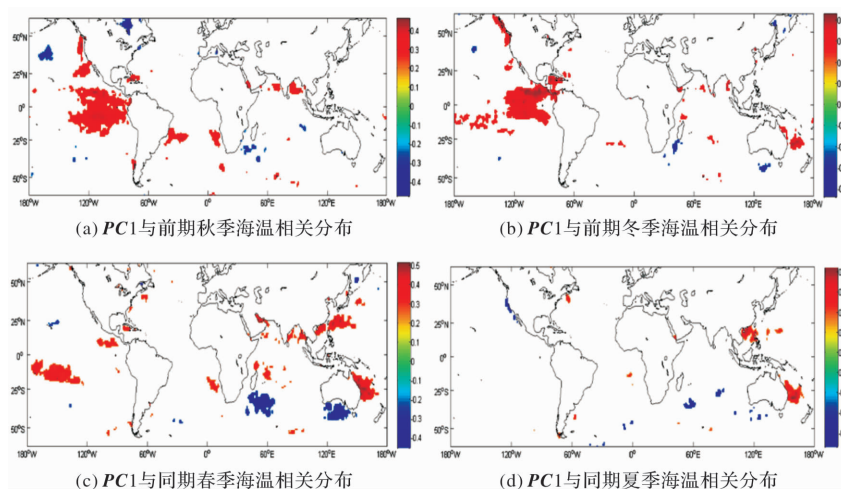
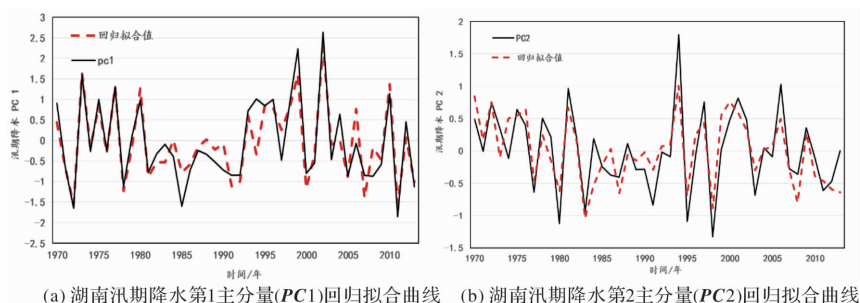
图3 全球海温与 $PC1$ 相关分析图(阴影部分为显著相关区,红色为正相关、蓝色为负相关)

图4 湖南汛期降水主分量回归拟合曲线(实线为原值,点线为回归值)

省降水偏少年份,全省的降水距平百分率几乎都为负值,在湘北、湘中地区偏少的成数较大,从预报值的分布看,与实际情况也有较好的对应(图5)。

### 2.3.6 期望损失计算

由超越概率曲线、 $x$ 轴和 $y$ 轴围成的面积,即为期望损失,分为年期期望损失和次期望损失(图6);例如,计算当湖南汛期 $PC1$ 为0.23时,年度洪涝灾害期望损失为52.1亿元,与实际发生的情

况相符。

## 3 结论

科学评估年度灾害风险,可为提升灾害风险防范和备灾工作针对性提供重要依据,而此项研究刚起步。本文依据灾害概率风险评估理论,考虑

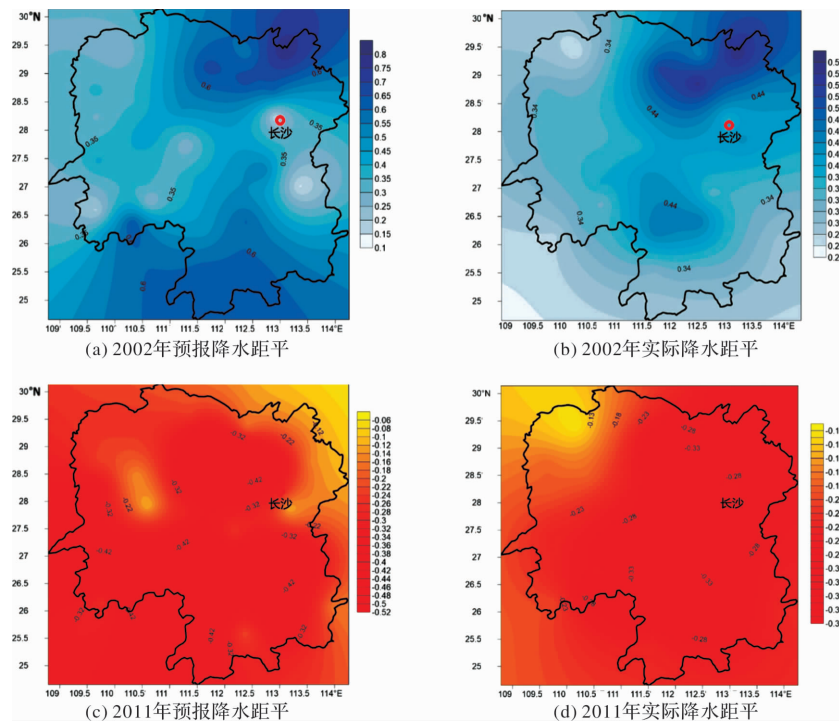


图5 极端年份预报降水距平与实际降水距平对比

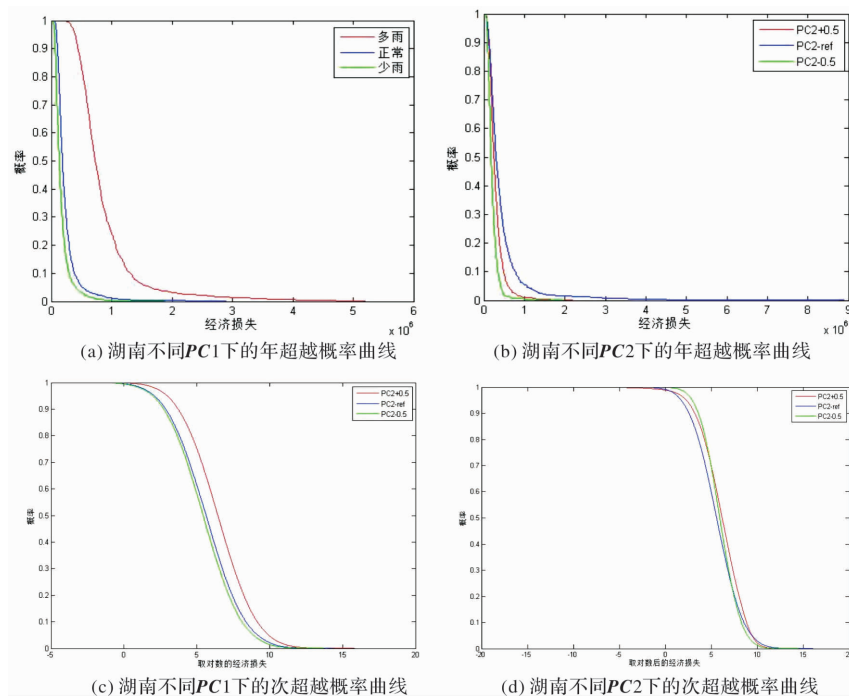


图6 湖南不同降水情景下的年超越概率曲线和次超越概率曲线

汛期降水的可预报性, 基于历史洪涝灾害事件, 尝试性地构建了年度洪涝灾害风险评估模型, 以湖南为例, 对评估模型进行了检验与应用。主要结论如下:

(1) 分析年度汛期降水时空分布特征, 建立了降水回归预报方程, 利用前期相关海域海温、环流指数等因子对降水进行预报, 为风险评估提供分析基础。

(2) 基于历史灾害事件记录, 研究应用概率风险分析得到年度不同降水规模下的直接经济损失

分布, 并结合蒙特卡洛仿真模拟的方法求解损失的超越概率曲线, 包括 *OEP* 曲线和 *AEP* 曲线, 决策者可以根据这些信息得到面临不同风险水平下的单次最大可能损失、年度总损失以及年期望损失, 实现风险评估方法论与国际接轨。

(3) 模型集“未来年度汛期降水预测”、“降水与损失分布关系拟合”、“损失超越概率评估”于一体, 是对全过程年度洪涝灾害风险评估方法的新探索。

(4) 湖南年度洪涝灾害评估案例表明, 本文建

立的模型可操作,结果与实际情况相符。

当然,模型还存在一些不足:如由于不同区域各类数据质量参差不齐,特别是灾情数据资料,湖南洪涝灾害灾情数据较为完整,案例分析具有较好的借鉴意义;在数据不足情况下,也可以进行年度风险评估,但要继续深入研究在数据质量欠佳的情况下对年度风险评估结果可靠性和不确定性的评价,以及对这种不确定性的有效表达和展示,提升公众和管理者对风险的认知和理解水平。

## 参考文献:

- [1] 万金红,张葆蔚,刘建刚,等. 1950—2013 年我国洪涝灾情时空特征分析[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 63—68.
- [2] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485—491.
- [3] 果鹏,夏军强,陈倩,等. 基于力学过程的蓄滞洪区洪水风险评估模型及应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 858—867.
- [4] 国家气候中心. 国家气候中心、财新智库在京联合首发中国气候指数系列[EB/OL]. (2017-03-07)[2018-05-20]. <http://ncc.cma.gov.cn/Website/?NewsID=10479>.
- [5] 唐丽华,苗崇刚,宋立军,等. 年度地震危险区地震灾害应急风险评估指标体系构建初探[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 153—155.
- [6] 国土资源部. 国土部预测 2018 年地质灾害趋势. [EB/OL]. (2018-01-08)[2018-05-20]. [http://www.stdaily.com/cxzg80/kebaojicui/2018-01/08/content\\_618974.shtml](http://www.stdaily.com/cxzg80/kebaojicui/2018-01/08/content_618974.shtml).
- [7] 方伟华,王静爱,史培军,等. 综合风险防范——数据库、风险地图与网络平台[M]. 北京:科学出版社, 2011.
- [8] 王雪臣,冷春香,冯相昭,等. 长江中游地区洪涝灾害风险分析[J]. 科技导报, 2008, 26(2): 61—66.
- [9] 陈绍东,王谦谦,钱永甫. 江南汛期降水基本气候特征及其与海温异常关系初探[J]. 热带气象学报, 2003, 19(3): 260—268.
- [10] 周晓霞,王盘兴,祝昌汉,等. 全球海温异常年代际分量的方差贡献及其与中国气候异常的相关[J]. 应用气象学报, 2005, 16(1): 96—104.
- [11] 龚光鲁,钱敏平. 应用随机过程教程及其在算法和智能计算中的应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [12] 刘悦忆,赵建世,黄跃飞,等. 基于蒙特卡洛模拟的水质概率预报模型[J]. 水利学报, 2015, 46(1): 51—57.
- [13] 崔玉娟,叶瑜,方修琦. 基于 EOF 分析的江浙沪地区汛期降水时空变化特征研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 651—656.

## Annual Flood Disaster Risk Assessment Model and its Application

ZHOU Hongjian<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>2</sup>, HU Xinjia<sup>2</sup> and YUAN Yi<sup>1</sup>

(1. National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China;

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Based on the theory of disaster probabilistic risk assessment, considering the predictability of precipitation in flood season and the historical flood events databases, the annual flood disaster risk assessment (AFDRA) model is constructed. Taking Hunan as an example, the AFDRA model is tested and applied. The results show that: (1) the model establishes the regression forecasting equation from the temporal and spatial distribution of regional precipitation and sea surface temperature (SST), atmospheric circulation index factors; to delineate the direct economic loss distribution under different annual precipitation scenarios by the support of probabilistic risk analysis; the biggest annual flood disaster loss, the total loss of the year and the expected annual loss are evaluated based on Monte Carlo simulation. (2) The AFDRA model is a new exploration of the all-process of the annual flood disaster risk assessment method. (3) The results from the Hunan case show that the AFDRA model is operable and are consistent with the actual situation. This study can provide a new perspective for improving the content and technical methodology of disaster risk assessment, and can also provide a reference for the practice of business practice for annual flood disaster risk assessment.

**Key words:** annual risk; flood disaster; risk assessment model; probabilistic risk; Hunan