

汪杨骏, 张韧, 钱龙霞, 等. 海平面上升引发的极端高水位的频率风险评估模型及其应用——以宁波为例[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 213-218. [Wang Yangjun, Zhang Ren, Qian Longxia. Model for Probabilistic Risk Assessment in Extreme High Water Level Caused by Rising Sea Level and Its Application——A Case Study in Ningbo[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 213-218.]

# 海平面上升引发的极端高水位的频率风险评估模型及其应用

## ——以宁波为例\*

汪杨骏<sup>1</sup>, 张韧<sup>1</sup>, 钱龙霞<sup>1</sup>, 葛珊珊<sup>1</sup>, 王锋<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学气象海洋学院, 江苏南京 211101;

2. 河北省唐山市曹妃甸工业区气象局, 河北唐山 063000)

**摘要:** 海平面上升是全球变化研究的热点, 海平面上升引发的极端高水位事件将严重威胁沿海城市的经济发展和社会生活。因此在当前气候变化背景下, 开展极端高水位事件的风险评估显得尤为重要和迫切。对此引入频率风险思想, 从极端高水位事件发生的频率、强度和造成的后果等角度构建了频率风险的概念模型和评价指标体系, 建立了基于耿贝尔极值法、灰色 Verhulst 模型和 ArcGIS 平台的极端高水位频率风险评估模型; 以浙江省宁波市为例, 进行了气候变化情景下不同极端高水位发生频率对我国沿海城市遭受经济损失的风险评估实验。结果表明, 基于国内外众多学者对我国极端高水位预估情景, 2050 年极端高水位事件的发生频率预期将远大于当前, 沿海城市岸堤的防范能力较之目前将有大幅度的降低; 并给出了不同强度的极端高水位事件对宁波市构成潜在威胁和经济损失风险的定量评估。

**关键词:** 海平面上升; 极端高水位; 频率风险分析; 耿贝尔极值法; 灰色 Verhulst 模型; 宁波

**中图分类号:** X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)01-0213-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.01.039

IPCC 第五次报告指出自 20 世纪起海平面上升的速度在加快。到 21 世纪, 在所有 RCPs 情境下, 海平面上升的速率很可能都将超出 1971-2010 年的海平面上升速率, 同时平均海平面上升将很可能致使未来城市沿岸极端高水位事件呈上升趋势<sup>[1]</sup>。沿海城市是世界上人口、经济和社会发展的主要区域和集聚中心, 也是自然灾害易发和频发区域<sup>[2]</sup>。由于海平面上升, 将缩短极端高水位重现时间, 降低如机场、隧道等沿海基础设施的设计标高<sup>[3]</sup>。越来越多证据表明, 极端高水位发生的频率和强度的增强是影响未来沿海城市社会经济体系正常运行的重大威胁。

近年来, 日益严重的灾害问题已经引起政府和学术界的广泛关注, 以救灾为主的灾后管理已经无法应对气候变化背景下未来不断增大的灾害损失和风险, 开展有效的灾害风险评估与管理是沿海地区预防自然灾害、控制和降低灾害损失的重要基础性工作<sup>[4]</sup>。国内相关研究如下: 基于历史典型洪水或不同重现期洪水情景开展分析, 研究洪水发生的特征并评价其对城市造成的风险<sup>[5-7]</sup>, 对未来极端高

水位事件的强度或者频率的变化进行预测<sup>[8-11]</sup>。国外的研究侧重于对某一重现期内的极端高水位事件发生的综合风险进行评估, 得到其对沿海城市整个社会经济系统造成的风险<sup>[12-14]</sup>。

综上所述, 目前国内对于极端高水位事件风险的研究, 比较侧重于过去极端高水位事件的分析或对未来极端高水位事件强度或频率的预测, 对极端高水位事件产生的后果及风险, 考虑相对不足。此外, 对极端高水位事件危险性的分析, 也多限于单一要素(或事件发生的频率或事件发生的强度), 综合考虑多风险要素, 对事件进行较全面的频率风险分析、分析不同事件序列下, 极端高水位事件的综合风险评估还较为欠缺。为此, 本文选择受海平面上升引发的极端高水位事件影响严重的宁波作为典型案例, 综合考虑极端高水位事件发生的频率、强度及产生的后果等要素, 开展气候变化背景下极端高水位事件频率风险分析, 探索气候变化区域响应的灾害风险理论分析方法、剖析典型案例, 为我国沿海城市可持续发展和防范气候变化灾害提供科学依据和决策支持。

\* 收稿日期: 2015-05-12 修回日期: 2015-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41276088); 唐山市曹妃甸工业区专项课题(CQZ-2014001)

作者简介: 汪杨骏(1990-), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 从事海洋环境风险评估研究. E-mail: 492670449@qq.com

通讯作者: 张韧(1963-), 男, 四川峨眉人, 教授、博士生导师, 从事海洋环境影响评估与决策研究. E-mail: zrpaper@163.com

表 1 频率风险指标体系

极端高水位事件强度 $Z$			
极端高水位事件频率 $P$			
频率密度风险 $R$	脆弱性 $V$	路面高程 $Y$	
		洪水强度 $Z$	
极端高水位事件后果 $C$	暴露资产 $A$	受灾人口 $PS$	人口密度 $\rho$
		受灾面积 $S$	
		人均财产 $As$	

式中： $P_s$  为受灾人口； $\rho$  为人口密度； $S(Y)$  为某一路地高程上的面积， $A_s$  为人均资产。

因此，极端高水位事件的后果可定义为：

$$C = \int_0^Z V \times AdY. \tag{4}$$

## 1 频率风险指标与算法模型

频率风险分析(风险分析的频率方法)是一种对系统的安全性进行分析的有效途径；它不仅考虑最坏的受灾情况，还全面考虑可能的情形及相应后果，并使发生这些情形发生频率也成为合理定量处理不确定性的关键因素。频率风险可以定义为：导致破坏的事件序列(意外情况)、相应的频率和对应的结果。在这种观点中，风险分析的结果是一张不同情形发生的频率和后果的量化表，两者共同代表了风险<sup>[15]</sup>。因此，以极端高水位事件为例，频率风险是由不同极端高水位事件序列、发生的可能性以及其造成的后果综合作用而成。沿海地区海平面上升引发的极端高水位事件的频率风险指标体系如表 1 所示。

### 1.1 事件强度和频率

强度和频率是描述极端高水位事件的两个重要指标，其中，强度是极端高水位事件发生时的水位高度，用  $Z$  表示；频率是单位时间内，该极端事件发生的次数，用  $P$  表示。本文基于耿贝尔极值法计算极端高水位事件发生的频率，用参数估计法计算强度。

根据频率风险分析的定义，本文的极端高水位事件序列由极端高水位的强度表示，不同的极端高水位强度代表不同的极端高水位事件：

$$Z = \{z_1, z_2, z_3 \dots z_n\}. \tag{1}$$

### 1.2 事件后果 $C$

后果是由暴露在灾害中的总资产及其脆弱性两部分组成。当极端高水位事件发生时，会对承灾体的社会经济体系造成危害。造成的后果不但与受灾区暴露在洪水中的总资产有关，而且与受灾区的地理位置有关。不同海拔高度的受灾区面对极端高水位事件时，其暴露在洪水中的资产所遭受的损失是不一致的，脆弱性函数可表示为：

$$V(Z - Y) = (Z - Y) / (Z - Y + 1). \tag{2}$$

式中： $Z$  为极端高水位强度； $Y$  为陆地高程。资产的脆弱性会随着给定的水位差的变化而发生变化。例如当水位差为 1 m 时，暴露在极端高水位中的 50% 的资产会遭受损失<sup>[16]</sup>。

相关研究表明，一个城市居民的财产大致相当于一个城市年均 GDP 的 5 倍<sup>[17]</sup>，因此可将暴露性资产近似定义为：

$$A = P_s(Z - Y) \times A_s \times 5 \rho \times S(Y) \times A_s \times 5. \tag{3}$$

### 1.3 频率风险算法模型

综合上述频率风险指标，可得到频率风险的评估模型：

$$Risk = f(Z, V, C) = P_{ow} \times \int_0^Z V \times AdY = P_{ow} \times \int_0^Z \left( \frac{Z - Y}{(Z - Y + 1)} \right) \times 5 \times A_s \times \rho \times S(Y) dY, \tag{5}$$

式中： $Z = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\}$ 。

## 2 极端高水位事件的频率风险评估模型

### 2.1 耿贝尔极值分布

耿贝尔<sup>[18]</sup>首次把 Fisher - Tippett I 型极值分布用于水文统计中，故称之为耿贝尔分布。由于耿贝尔分布形式简单，而且对海平面极值的拟合效果较好，故此采用耿贝尔分布方法研究由海平面上升引起的极端水位频率和强度变化，其表达式为：

$$F = \exp(-\exp(\frac{\mu - z}{\lambda})). \tag{6}$$

式中： $\mu$  为位置参数； $\lambda$  为尺度参数。

#### 2.1.1 极端高水位频率

假设 1：各极端高水位事件相互独立，且极端高水位事件发生次数的可能性服从泊松分布<sup>[19]</sup>，则

$$F = 1 - E = \exp(-T/R) = \exp(-N). \tag{7}$$

式中： $F$  为在一段时间内，海平面高度没有超过给定最高水位的频率。 $E$  为在一段时间内，海平面高度至少有一次超过给定最高水位的频率； $T$  为重现期； $R$  为发生超过给定最高水位事件的平均时间间隔； $N$  为在一个给定时间，平均超出给定最高水位的事件次数。

将式(7)代入式(6)，则得

$$N = \exp(\frac{\mu - z}{\lambda}). \tag{8}$$

假设 2：不同极端高水位事件发生的频率为  $P_N$ ，则极端高水位事件发生的频率期望  $N_E$  是

$$N_E = \int_{-\infty}^{+\infty} P_N N dN. \tag{9}$$

假设 3：尺度参数  $\lambda$  不随海平面的上升而改变。在一段时间  $T$  内，当  $N = 1$  时， $\mu = z$ 。令海平

面高度  $z = z_0 + \Delta z + z'$ 。其中  $z_0$  是一段时间内海平面高度平均值,  $\Delta z + z'$  是未来预估的平均海平面上升高度, 其中  $\Delta z$  为预估的中心值,  $z'$  为围绕零值的随机分布函数。则

$$N_{ov} = \int_{-\infty}^{+\infty} P(z') \exp\left(\frac{\mu - (z_0 + \Delta z + z')}{\lambda}\right) dz' = N_E \exp\left((\Delta z + \lambda \ln(\int_{-\infty}^{+\infty} P(z') \exp(\frac{z'}{\lambda}) dz')) / \lambda\right) \quad (10)$$

式中:  $N_{ov}$  即为未来极端高水位发生次数。

### 2.1.2 极端高水位强度

设一组极端高水位最高潮位的历史数据  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 用矩估计法<sup>[20]</sup>可以拟合得到耿贝尔分布的尺度参数和位置参数。

$$\begin{cases} 1/\lambda = \frac{\pi}{\sqrt{6}S} \\ \mu = \bar{x} - 0.5772\lambda \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S$  是  $X$  的标准差估计值;  $\bar{x}$  是  $X$  的均值。将式(11)代入式(6)可得

$$Z = (-\ln(-\ln(F)) - 0.5772)\lambda + \bar{x} = (-\ln(-\ln(1 - \frac{1}{T}) - 0.5772)/\lambda + \bar{x}) \quad (12)$$

式中:  $Z$  即为未来极端高水位发生强度(水位)序列,  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

## 2.2 灰色 Verhulst 模型

灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法。灰色系统理论以“部分信息已知, 部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象, 主要通过对“部分”已知信息的生成、开发来提取有价值的信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。灰色 Verhulst 模型主要是用来研究具有饱和状态 S 型序列的, 而人口和人均 GDP 随时间的变化曲线符合此规律<sup>[21]</sup>。因此, 引入灰色 Verhulst 模型来预测宁波市的人口和人均 GDP 水平<sup>[22]</sup>。

### 2.2.1 灰色 Verhulst 预测模型

设在一个模型预测中, 原始数列:  $x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n))$ , 为了弱化呈离散状态的原始数据, 对原始时间序列做一次累减, 经过处理的时间序列称为累减序列:  $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n))$ ; 然后通过对原始数据序列累加生成的递增序列实行紧邻均值生成  $z^{(1)}$ 。定义数据矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & (z^{(1)}(2))^2 \\ -z^{(1)}(3) & (z^{(1)}(3))^2 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & (z^{(1)}(n))^2 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

计算参数

$$\tilde{u} = (\tilde{a}, \tilde{b})^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (13)$$

式中: 符号  $\sim$  表示估计值。则 Verhulst 模型的白化

方程为:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b(x^{(1)})^2 \quad (14)$$

### 2.2.2 灰色 Verhulst 预测模型求解

解式(14)得:

$$x^{(1)}(t+1) = \frac{ax^{(0)}(1)}{bx^{(0)}(1) + (a - bx^{(0)}(1))e^{at}} \quad (15)$$

用  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$  替代上式中的  $a$ ,  $b$ , 得

$$\tilde{x}^{(1)}(t+1) = \frac{\tilde{a}x^{(0)}(1)}{\tilde{b}x^{(0)}(1) + (\tilde{a} - \tilde{b}x^{(0)}(1))e^{at}} \quad (16)$$

最后对模型进行检验, 得到人口密度  $\rho$  和人均 GDP  $A_s$  的预估值。

## 2.3 ArcGIS 地理信息系统

地理信息系统(GIS)利用计算机建立地理数据库, 将空间地理分布状况及所具有的属性进行数字存储, 建立数据管理系统, 同时开发各种分析和处理功能, 以便快速获取信息, 并将处理结果以地图、图形及数据的形式表示出来。GIS 的核心是管理、计算、分析地理坐标位置信息及相位置上属性信息的数据库系统。本文引入 ArcGIS 平台, 基于 DEM 数字高程数据, 对研究区数字高程数据和风暴潮水位基准数据进行坐标系统匹配和高程基准转化。匹配后二者均以 WGS84 坐标系统为水平基准面, 以吴淞高程为零基准面。通过“空间分析”中“地图代数”中的“栅格计算器”计算出不同陆地高程包含的城市面积, 拟合得到宁波市的“高程——面积”函数  $S(Y)$ 。

## 3 基于气候变化情景的风险评估

### 3.1 研究区概况

浙江省宁波市位于东海之滨, 陆域总面积达 9 816 km<sup>2</sup>, 坐拥漫长的海岸线, 但市区平均海拔不到 6 m, 易受到海平面上升的影响引发风暴潮, 极端高水位等自然灾害。截止到 2013 年末, 全市拥有户籍人口 580.1 万, 实现地区生产总值(GDP) 7 100 亿元, 作为浙江省第一大工业城市, 对其受极端高水位灾害的损失情况进行风险评估, 有一定的代表性和实用性。

### 3.2 宁波市极端高水位风险评估

#### 3.2.1 模型可靠性分析

为检验模型的可靠性, 探讨该模型对于 2050 年宁波市所遭受的极端高水位事件的风险评估结果的实用价值, 本文结合宁波水文站发布的《水情年报》和国家海洋局发布的《中国海洋灾害公报》得到历年极端高水位事件发生的时间、强度以及造成的实际经济损失, 再根据极端高水位发生年份宁波市人口和人均生产总值数据, 得到评估模型模拟的经济损失如表 2 所示。

表 2 宁波市极端高水位事件经济损失模拟数据与实际数据对比

极端高水位事件	极端高水位强度/m	实际经济损失 亿元	模拟经济损失 亿元
2009 年“莫拉克”台风	4.64	11.85	12.04
2012 年“海葵”台风	4.99	41.5	39.59
2013 年“菲特”台风	4.77	34.92	38.5

通过表 2 可知, 该风险评估模型模拟的历年极端高水位事件经济损失与实际经济损失非常接近, 其模拟结果是可信的, 因此可以利用该模型进行下一步的分析。

### 3.2.2 2050 年极端高水位发生的频率和强度

首先构建正态分布模型, 将 2050 年中国海平面上升不同的预估结果(表 3)代入式(17), 以模拟未来海平面上升的总体情况<sup>[23]</sup>。并对该模型作 Kolmogorov-Smirnov 检验, 检验结果见表 4, 模型中各变量的相关统计量见表 5。

$$P(z') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z')^2}{2\sigma^2}\right) \quad (17)$$

表 3 中国沿海未来海平面变化的预估成果

预估区域	2050 年预估结果/m (相对于 1990 年)	专家或研究小组
中国沿海	0.58 ~ 1.03	郑文振 <sup>[24]</sup>
中国沿海	0.13 ~ 0.50	张锦文, 等 <sup>[25]</sup>
长江三角洲地区	0.37 ~ 0.61	刘杜鹃, 等 <sup>[26]</sup>
长江三角洲地区	0.31 ~ 0.68	沈明洁, 等 <sup>[27]</sup>
长江三角洲地区	0.25 ~ 0.51	施雅风, 等 <sup>[28]</sup>
长江三角洲地区	0.30 ~ 0.65	武强, 等 <sup>[29]</sup>
长江三角洲地区	0.50 ~ 0.70	中国科学院地学部 <sup>[30]</sup>
浙江沿海海平面	0.15	伍远康, 等 <sup>[31]</sup>

表 4 K-S 检验结果

步骤	P 值	置信度
1	0.946 8	0.95

表 5 最终模型统计量

	标准差 $\sigma$	中心值 $\Delta z$
海平面上升	0.239 9	0.484 7

由表 3 可知, Kolmogorov - Smirnov 检验的 P 值落在置信区间内, 检验通过, 接受原假设, 即未来中国海平面上升的总体情况符合正态分布。将式(17)代入(10)得:

$$N_{ov} = N_E \exp\left(\left(\Delta z + \frac{\sigma^2}{2\lambda}\right) / \lambda\right) \quad (18)$$

将表 5 中各变量代入式(18)得  $N_{ov} = 44.5 N_E$ , 其中尺度参数  $\lambda = 0.1718 m$ , 是由宁波水文站所得 1950 - 2006 年宁波历史最高潮位数据代入(11)所得。因此 2050 年, 极端高水位发生的频率为:

$$P_{ov}(T) = \frac{N_{ov}}{T} = 44.5 \frac{1}{T} \quad (19)$$

式中:  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ , 由式(12)得, 2050 年极端高水位事件发生的强度为:

$$Z = \left(-\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) - 0.5772\right)\right) / 0.1718 + 4.31 \quad (20)$$

### 3.2.3 2050 年平均人口密度和人均 GDP

(1)用灰色 Verhulst 模型对 1997 - 2013 年的人口密度和人均 GDP 的时间序列(数据资源来自宁波统计局)进行重构并检验精度;

(2)对于人均 GDP 模型的检验:  $C = 0.103 0$ ,  $P = 1$ ; 根据表 6 得到该模型属于第 I 精度, 可以进行长期预测;

(3)对于人口密度模型的检验:  $C = 0.177 6$ ,  $P = 1$ ; 根据表 6 得到该模型属于第 I 精度, 可以

进行长期预测。

表 6 模型精度表

模型精度等级	方差比 C	小误差频率 P
I	<0.35	>0.95
II	<0.50	<0.80
III	<0.65	<0.70
IV	>0.80	<0.60

于是, 采用灰色 Verhulst 模型对未来进行预测。

根据图 1, 可拟合得到未来 2050 年的人均 GDP( $As$ )估算为 26.366 万元。人口密度( $\rho$ )估算为 679 人/ $km^2$ 。

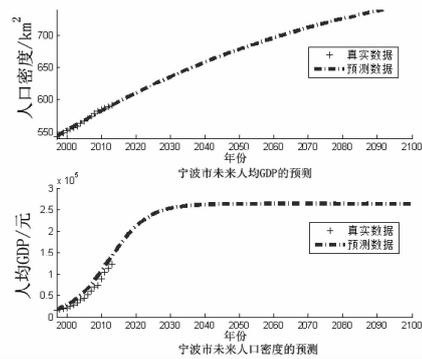


图 1 宁波市未来人口经济状况预测

### 3.2.4 宁波市路面高程 - 面积关系

通过 ArcGIS 地理信息系统提取宁波市的数字高程图模型, 计算得到不同陆地高程与所其包含的面积如图 2 所示, 通过拟合得到高程 - 面积函数表达式(1)。

$$S(Y) = 846.5 \times e^{-\left(\frac{Y-4.527}{2.506}\right)^2} \quad (21)$$

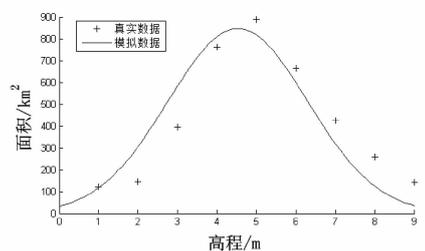


图 2 宁波市路面高程 - 面积关系

### 3.2.5 2050 年极端高水位风险

联立式(5)、式(19)、式(20)、式(21)得到极端高水位事件风险模型:

$$Risk = P_{ov} \times \int_0^Z \left(-\frac{Z-Y}{(Z-Y+1)} \times \rho \times S(Y) \times As \times 5\right) dY \quad (22)$$

将  $P_{ov}$ ,  $As$ ,  $\rho$ ,  $S(Y)$  代入上式, 则

$$Risk = \frac{3.37 \times 10^9}{T} \int_0^Z \left(\frac{Z-Y}{(Z-Y+1)} e^{-\left(\frac{Y-4.527}{2.506}\right)^2}\right) dY \quad (23)$$

式中:  $Z = \left(-\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right) - 0.5772\right)\right) /$

0.1718 + 4.31),  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

查阅宁波水文站资料得到, 当前宁波市的保证水位平均值为 4.38 m, 若极端高水位超出 4.38 m 则会造成灾情。2050 年宁波市极端高水位事件频率与强度分布情况如图 3 所示, 在不加固任何岸防措施的情况下, 超出保证水位的极端高水位事件强度和频率由图 3 中阴影部分表示。结果显示, 气候变化背景下, 估计 2050 年后宁波市年均至少发生 11 次强度超过保证水位的极端高水位事件, 重现期一年的极端高水位事件强度可达 5.06 m。

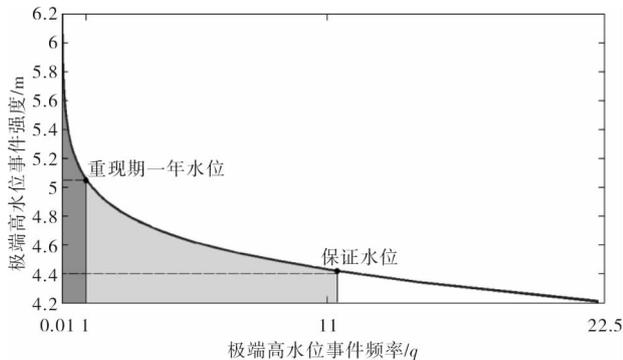


图3 宁波市 2050 年极端高水位事件频率-强度分布

风险就是频率和后果的乘积。图 4 阴影部分面积代表宁波市在 2050 年若不采取任何的措施加固加高岸防提高保证水位情形下, 不同极端高水位事件年均可能造成的风险。图 4 中的频率风险模型分析, 2050 年, 仅一次强度达到保证水位的极端高水位事件便可对宁波市造成约 3 200 亿元的经济损失, 且强度达到保证水位的极端高水位事件对该市的损失最大。

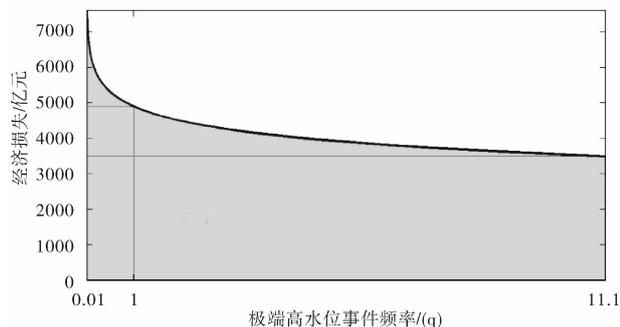


图4 宁波市 2050 年频率风险分析

## 4 结论

(1) 引入频率风险分析思想, 从极端高水位事件的强度、频率和后果的角度建立了较为系统的极端高水位事件的频率风险分析指标体系和频率风险算法模型。

(2) 利用耿贝尔极值法模拟了极端高水位事件发生的强度和频率, 结合灰色预测理论和 ArcGIS 平台, 建立了极端高水位事件的频率风险评估模型。

(3) 针对气候变化背景下, 2050 年海平面上升, 对宁波市极端高水位事件发生频率及其岸堤抵御极端高水位事件的能力和经济损失进行了情景预估。

(4) 研究思想和技术途径旨在为我国沿海地区抵御和防范气候变化极端事件和灾害风险, 提供科学参考。

## 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M/OL]. Cambridge: Cambridge University Press, in press, (2013) [2014-05-06]. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wgl/>.
- [2] 谢翠娜. 上海沿海地区台风风暴潮灾害情景模拟及风险评估[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [3] Becker A H, Acciaro M, Asariotis R, et al. A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society [J]. Climatic Change, 2013, 120 (4): 683-695.
- [4] 许世远, 王军, 石纯, 等. 沿海地区自然灾害风险研究[J]. 地理学报, 2006, 61(2): 127-138.
- [5] 杨佩国, 杨勤业, 吴绍洪, 等. 基于数值模拟的黄河下游不同情景溃堤洪水特征[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 328-336.
- [6] 夏富强, 康相武, 吴绍洪, 等. 黄河下游不同洪水情景决溢风险评价[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 229-239.
- [7] 赵庆良, 王军, 许世远, 等. 沿海城市社区暴雨洪水风险评价: 以温州龙湾区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(4): 665-674.
- [8] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 海平面上升背景下黄浦江极端风暴洪水危险性分析[J]. 地理研究, 2013, 12: 2215-2221.
- [9] 宗虎城, 章卫胜, 张金善. 海平面上升对黄浦江风暴潮水位影响研究[J]. 人民长江, 2014, 45(9): 1-7.
- [10] 宋美钰, 王福, 王宏. 21 世纪中叶天津沿海地区极端高水位趋势预测[J]. 地质通报, 2008, 27(6): 829-836.
- [11] 董胜, 徐海博. 滩海地区风暴增水的季节变化对极端高水位确定的影响[C]// 2006 年度海洋工程学术会议. 北京, 2006.
- [12] Flather R, Baker T, Woodworth P, et al. Integrated effects of climate change on coastal extreme sea levels [C]// Proudman Oceanographic Laboratory. Internal Document No. 140, Bidston, UK, 2001.
- [13] Lowe J A, Gregory J M, Flather R A. Changes in the occurrence of storm surges around the United Kingdom under a future climate scenario using a dynamic storm surge model driven by the Hadley Centre climate models[J]. Climate Dynamics, 2001, 18(3/4): 179-188.
- [14] Hanson S, and Nicholls R J, Extreme flood events and port cities through the twenty-first century [C]//Asariotis R, Benemara H. Maritime transport and the climate change challenge. New York: Earthscan/Routledge, 2012: 243.
- [15] Enrico Zio, 翟庆庆. 可靠性与风险分析蒙特卡罗方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 9-10.
- [16] Hinkel J, Lincke D, Vafeidis AT, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2014, 111(9): 3292-3297.
- [17] Hanson S, Nicholls R, Ranger N, et al. A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes [J]. Climatic Change, 2011, 104(1): 89-111.
- [18] BNnk HWVD, Können GP. Estimating 10000-year return values from short time series[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(1): 115-126.
- [19] Pugh D T. Tides, surges and mean sea-level[J]. Physics & Chemistry of the Earth Part A Solid Earth & Geodesy, 1987, 25(1): 53-56.
- [20] 候瑞科. 利用耿贝尔极值分布计算年最高水位[J]. 海洋通报, 1993, 12(3): 126-129.
- [21] 胡泊. 灰色 verhulst 模型在长春市人口预测中的应用[J]. 经济视角, 2009, 12(6): 21-23.

- [22] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]// MATLAB 在数学建模中的应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 65-66.
- [23] George A Backus, Thomas S Lowry, Warren D E. The near-term risk of climate uncertainty among the U. S. states[J]. Climatic Change, 2013, 116(3/4): 495-522.
- [24] 郑文振. 全球和我国近海验潮站及任意地点(区)的 21 世纪海平面预测[J]. 海洋通报, 1996, 15(6): 1-7.
- [25] 张锦文, 王喜亭, 王惠. 未来中国沿海海平面上升趋势估计[J]. 测绘通报, 2001, 18(4): 4-5.
- [26] 刘杜娟, 叶银灿. 长江三角洲地区的相对海平面上升与地面沉降[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 400-404.
- [27] 沈明洁, 谢志仁, 朱诚. 中国东部全新世以来海面波动特征探讨[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 886-894.
- [28] 施雅风, 朱季文, 谢志仁, 等. 长江三角洲及毗连地区海平面上升影响预测与防治对策[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2000, 30(3): 225-32.
- [29] 武强, 郑铎鑫, 应玉飞, 等. 21 世纪中国沿海地区相对海平面上升及其防治策略[J]. 中国科学, 2002, 32(9): 760-766.
- [30] 中国科学院地学部. 海平面上升对我国沿海地区经济发展的影响与对策[J]. 地球科学进展, 1993, 8(6): 15-25.
- [31] 伍远康, 汪邦道. 浙江省沿海海平面上升及预测[J]. 浙江水利科技, 2003, 12(2): 1-4.

## Model for Probabilistic Risk Assessment in Extreme High Water Level Caused by Rising Sea Level and Its Application —A Case Study in Ningbo

Wang Yangjun<sup>1</sup>, Zhang Ren<sup>1</sup>, Qian Longxia<sup>1</sup>, Ge Shanshan<sup>1</sup> and Wang Feng<sup>2</sup>

(1. Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China;

2. Meteorological Bureau of Caofeidian Industrial Zone, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** Sea level rise, which is a focus topic of global change study, will cause extreme high water level events bringing a series threat to the coastal city of economic development and social life. Therefore, in the background of the current climate change, we carry out risk assessment of extreme high water level events is particularly important and urgent. We introduce frequency risk ideology to construct frequency risk model and evolution index system containing frequency. Intensity and consequences of the extreme high water events. We established this model based on Gumbel extremum method, grey Verhulst model and ArcGIS platform, taking Ningbo city as an example to study the risk of the economic losses which China's coastal city has suffered under different extreme high water level scenarios with the climate change. The results show that the occurrence frequency of extreme high water level events will be far greater than the current bank coastal city based on many domestic and foreign scholars' predicting; the prevention ability will be greatly reduced. we also give the quantitative assessment of different extreme high water level events' potential threats to Ningbo and its economic losses.

**Key words:** sea level rise; extreme high water level; risk analysis of frequency; Geng Baer extremum method; grey Verhulst model; Ningbo

### 致谢审稿专家

2015 年,《灾害学》期刊编辑部工作得到了审读专家们的大力支持和帮助。来自灾害研究各领域的专家,在繁忙的工作中能及时、认真、细致地为《灾害学》稿件审读把关,表现出专家们严谨认真的治学精神、强烈的事业心、责任感和崇高的奉献精神。借此机会向给予《灾害学》许多帮助的专家们致以崇高的敬意!

审读专家名单以拼音为序:

陈 莉	陈 香	陈洪凯	陈长坤	程先富	程晓陶	程尊兰	单修政	邓建辉	丁德平	董惠娟
段 旭	范建容	方国华	方修琦	冯 平	冯 涛	冯民学	付 强	高 萍	高安宁	高建国
高雪梅	郭恩栋	郭建平	郭章林	何爱平	何思明	胡海清	胡凯衡	胡卸文	黄 强	黄崇福
黄嘉佑	霍治国	姜 彤	蒋忠信	金菊良	荆 沛	匡昭敏	雷 宛	雷小途	李 博	李 明
李炳乾	李翰林	李鸿晶	李健梅	李茂松	李胜乐	李世奎	李团胜	李小凡	李耀庄	李志强
廖玉芳	林均岐	林开平	林其钊	刘爱鸣	刘建达	刘吉夫	刘树坤	刘希林	刘小群	刘 瑜
骆正山	满志敏	欧国强	潘 懋	潘华盛	彭贵芬	阮爱国	商彦蕊	邵辉成	舒立福	宋立军
苏桂武	苏幼坡	唐 川	田玉敏	汪志国	王 民	王 勇	王冠雄	王海涛	王连喜	王绍玉
王晓青	王雁林	王振会	王志乔	韦方强	温家洪	吴国雄	吴先华	伍志方	肖宏跃	肖子牛
谢 洪	谢家智	谢永刚	辛吉武	徐双柱	徐向阳	徐选华	薛晓萍	延军平	杨立中	杨月巧
杨仲江	姚令侃	尹东屏	尹占娥	游 勇	于文金	余明高	喻大昭	袁志祥	岳乐平	张 弘
张 强	张 勤	张继权	张丽娟	张丽萍	张腾飞	张万诚	赵 妮	赵法锁	赵景波	赵林度
赵宪文	朱江春	邹逸江								

《灾害学》编辑部