

# 海岸地区致灾台风暴潮的长期分布模式

董 胜, 郝小丽, 李 锋, 刘德辅

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 考虑台风导致的高水位和海浪波高对风暴潮灾害的贡献, 对 1949 年以来影响青岛地区的台风暴潮进行了抽样统计。基于二维的泊松冈贝尔逻辑分布模式, 对海岸地区的致灾风暴潮进行了长期的随机分析。与传统的警戒水位法不同, 新模式能够反映多种环境荷载的综合作用, 推算了青岛地区的特大台风暴潮灾害的重现期。计算结果显示, 二维复合分布模式适合于描述台风暴潮过程中极值水位与相应波高的联合概率, 所得结论对青岛地区的防潮减灾规划和工程建设具有指导意义。

**关键词:** 海岸地区; 致灾; 台风暴潮; 二维泊松冈贝尔逻辑分布; 长期分布模式; 重现期

**中图分类号:** P731.23      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2005)01-0042-05

自 20 世纪 80 年代以来, 青岛市的经济建设取得了迅速的发展。由于地理位置相对偏北(约 36°N), 每年影响我国沿海地区的台风, 只有部分能够到达这一纬度附近, 即使如此, 建市百年以来, 青岛沿岸遭受了 4 次特大风暴潮灾害, 第 1 次发生于 1939 年 8 月 31 日, 台风中心通过胶州湾, 损失惨重。其余 3 次则发生在最近 20 年之内, 据统计<sup>[1]</sup>, 8509、9216 和 9711 号台风造成的直接经济损失分别为 5.08、6.80 和 2.17 亿元。台风暴潮灾害已经成为青岛沿海经济可持续发展的严重制约因素。

在我国沿海地区, 无论是风暴潮的灾情预报还是防潮堤坝的建设, 多以海岸潮位的变化(常常采用警戒潮位)作为相对标准。有研究表明, 严重的台风暴潮灾害往往是风暴潮与天文大潮相遇、同时叠加向岸大浪造成的。实测资料显示, 8509、9216 和 9711 号台风期间, 青岛观测站的潮位记录分别为 531、548 和 551 cm(相当于单因素法 20 年一遇、45 年一遇和 70 年一遇的极值水位<sup>[1]</sup>), 同时记录的青岛前海地区的波高达 5.5、5.0 和 5.2 m。然而, 潮位分别为 525 cm 和 536 cm 的 4908 和 8114 号台风也对青岛地区造成影响, 由于伴随发生的波高只有 2.5 m 和 0.7 m, 其危害较轻。为了克服单纯使用水位大小判别灾情失真的不足, 考虑台风导致的高水位和海浪等要素对风暴潮灾害的贡献, 对 1949 年以来影响青岛地区的台风暴潮进行了抽样统计, 提出泊松二维冈贝尔逻辑分布模式(Poisson Bi-variable Gumbel Logistic Distribution, PBCL), 对海岸地区的致灾风暴潮进行了重现期的推算, 首次对该地区的特大台风暴潮灾害进行了大小排序, 所得结论对青岛地区的防潮减灾规划和工程建设具有指导意义。

## 1 二维冈贝尔逻辑分布模式

复合分布(Compound Distribution)的概念首先由 Feller<sup>[2]</sup>提出。在工程设计中, 海洋环境条件的长期统计分析普遍采用 Pearson 型、Fisher-Tippett 极值分布、Weibull 分布等概率模型。考虑到台风每年对我国不同海区的影响不同, 我国学者提出了复合极值分布理论<sup>[3]</sup>, 先后将 Poisson-Gumbel 分布用于台风影响海域的波高或风速的极值预测<sup>[3]</sup>; 将 Poisson-Weibull 分布用于美国墨西哥湾、大西洋沿岸飓风海域的飓风风速、波高、中心气压

收稿日期: 2003-10-09; 修订日期: 2003-12-20

基金项目: “十五”国家科技攻关项目(2001BA80306); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目

作者简介: 董 胜(1968-), 男, 山东青岛人, 中国海洋大学教授, 博士, 主要从事海岸及海洋工程研究。

E-mail: dongsh@ouc.edu.cn

差等的长期极值预测<sup>[4]</sup>；将二项-对数正态复合极值分布用于短期观测资料的波高统计分析<sup>[3]</sup>。

复合极值分布理论提出后，在工程界得到了普遍重视：Langley 和 El-Shaarawi<sup>[5]</sup>对比了国际海洋工程界广泛应用的 6 种分布模式，认为复合极值分布模式具有与实测资料符合好、预测结果合理的优点；Kirby 和 Moss<sup>[6]</sup>认为此模式亦适用于洪水频率分析；Tsimplis 和 Blackman<sup>[7]</sup>在尼罗河三角洲的波候研究以及地中海波况研究中应用了这种模式；董胜等<sup>[8]</sup>在风暴潮增水的随机分析中提出了 Poisson-Pearson 分布。据不完全统计，我国核电站、码头、防波堤、跨海峡工程、轮渡工程、围垦工程、水利工程、各类军事工程等 30 多个工程项目，采用复合极值分布理论成功地推算各种设计因素的重现值，得到满意的结果。

为了估计每次台风过程中风速和波高对海洋平台的联合作用，刘德辅等<sup>[9]</sup>将一维复合极值分布推广到二维模型，提出了泊松-混合冈贝尔分布。由于该模型使用的一个必要条件是：两个变量之间相关系数的取值范围在  $[0, 2/3]$  之间，这极大地限制了模型的应用，因为在实际工程中，两个极值序列之间的相关系数不满足上述条件是经常遇到的。为此，本文提出了泊松-冈贝尔逻辑分布，使得二维模型更具有普遍意义。

如果工程所在海区每年发生的风暴潮次数  $n$  是一个离散型随机变量，其分布概率为  $P_k$ ；而每次风暴过程中的极值水位及相伴出现的波高设为  $(x, y)$ ，无风暴年份的水位及伴随出现的波高设为  $(x_0, y_0)$ 。设  $(x, y)$  和  $(x_0, y_0)$  为二维连续型随机向量，二者的联合概率分布函数分别为  $G(x, y)$  和  $Q(x, y)$ 。 $(x, y)$  的联合概率密度函数为  $g(x, y)$ ； $x$  的分布函数为  $G_x(x)$ 。设  $(x_i, y_i)$  为  $(x, y)$  的第  $i$  次观测值， $n$  为与  $(x, y)$  独立的取值为非负整数的随机变量，其分布函数记作

$$\begin{cases} P\{n = k\} = P_k & k = 0, 1, \dots \\ P_k = 1 \end{cases} \quad (1)$$

定义随机向量  $(X, Y)$

$$(X, Y) = \begin{cases} (x_0, y_0) & n = 0 \\ (x, y) \mid_j = \max_i x_i & n = 1 \end{cases} \quad (2)$$

则称

$$F(x, y) = P_0 \cdot Q(x, y) + \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cdot k \cdot \int_0^y \int_0^x G_x(u)^{k-1} g(u, v) \, du \, dv \quad (3)$$

为离散型分布  $P_k$  与连续型分布  $G(x, y)$  构成的二维复合型极值分布<sup>[9]</sup>。在典型的风暴海区，非风暴过程中出现的水位与波高一般较小，从  $(x_0, y_0)$  的物理意义可以看出：存在  $(x_0, y_0)$  满足  $P\{(x > x_0) \mid (y > y_0)\} = 0$ ，即  $Q(x, y) = 1$ 。由式(3)得

$$F(x, y) = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k \cdot k \cdot \int_0^y \int_0^x G_x(u)^{k-1} g(u, v) \, du \, dv \quad (4)$$

若风暴潮平均每年出现的次数为  $\lambda$ ，每年的出现频次  $n$  符合泊松分布，由式(4)可得

$$F(x, y) = \exp(-\lambda) \left[ 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda^k}{k!} \int_0^y \int_0^x G_x(u)^{k-1} g(u, v) \, du \, dv \right] \quad (5)$$

若  $G(x, y)$  符合混合型冈贝尔分布，由式(5)得到二维的泊松-混合冈贝尔分布<sup>[9]</sup>。若  $G(x, y)$  符合冈贝尔逻辑分布，其分布函数为<sup>[10]</sup>

$$G(x, y) = \exp \left\{ - \left[ \exp \left( - \frac{x - \mu_1}{1} \right) + \exp \left( - \frac{y - \mu_2}{2} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

式中  $r_{12}$  是表示随机变量  $x$  和  $y$  之间相关性的参数，若  $r_{12}$  为随机变量  $x$  和  $y$  之间的相关系数，可按  $\sqrt{1 - r_{12}^2}$  进行估计<sup>[10]</sup>。式(6)中随机变量  $x$  和  $y$  之边缘分布如下：

$$\begin{cases} G_x(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - \mu_1}{1} \right) \right] \\ G_y(y) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{y - \mu_2}{2} \right) \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中  $u_i$ 、 $i$  ( $i=1, 2$ ) 分别表示随机变量边缘分布的位置参数和尺度参数。对式(6)中的随机变量  $x$  和  $y$  求偏导数,得到  $x$  和  $y$  的联合概率密度函数为

$$g(x, y) = \frac{1}{1^2} A^{\frac{1}{2}} B^{\frac{1}{2}} \left( A^{\frac{1}{2}} + B^{\frac{1}{2}} \right)^{-2} \left[ \left( A^{\frac{1}{2}} + B^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} - ( - 1) \right] G(x, y) \quad (8)$$

式中  $A = \exp\left[-\frac{x - \mu_1}{1}\right]$ ,  $B = \exp\left[-\frac{y - \mu_2}{2}\right]$ 。将式(8)代入式(5),即得 PBC 模型。若随机变量  $X$  和  $Y$  超过某值  $x$  和  $y$  时, 其发生概率  $p$  与累积概率  $G$  互余, 对应的联合重现期  $T$  则为  $p$  的倒数。

## 2 致灾台风暴潮的重现期推算

选取青岛海洋观测站在发生致灾台风暴潮时的最大水位以及同时发生的青岛前海地区的波高观测值, 组成二维统计序列, 见图 1 和图 2。经过  $\chi^2$  检验, 在显著水平为 0.05 时, 台风的发生次数服从泊松分布。对水位和波高序列分别进行冈贝尔分布的拟合, 经过  $K-S$  统计检验, 在显著水平为 0.05 时, 二者皆符合冈贝尔分布, 见图 3 和图 4。

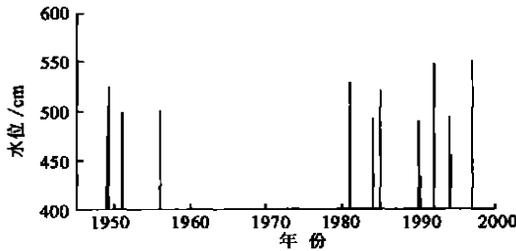


图 1 致灾台风暴潮的最高水位观测值

Fig. 1 Observed extreme water level during each storm process

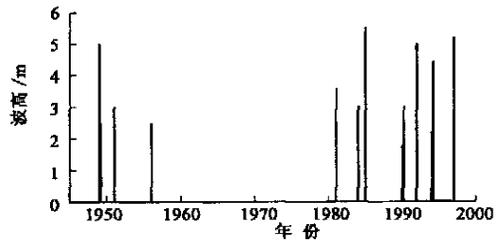


图 2 致灾台风暴潮的波高观测值

Fig. 2 Observed wave height during each storm process

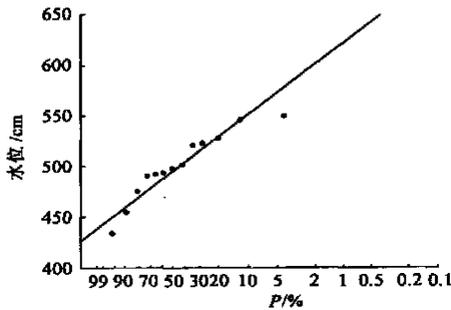


图 3 水位的冈贝尔分布

Fig. 3 Gumbel distribution of water level

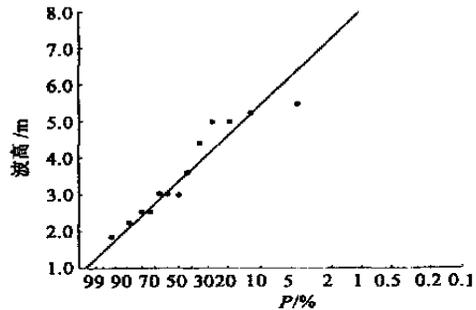


图 4 波高的冈贝尔分布

Fig. 4 Gumbel distribution of wave height

当青岛地区台风暴潮产生的 50 年一遇的潮位 561 cm 时, 由图 5 可知, 最可能出现的波高为 3.5 m。由二维泊松冈贝尔逻辑分布得到的概率等值线见图 6。若极值水位到达现在青岛市划定的警戒水位 525 cm, 它与波高 3.0、4.0、5.0 和 6.0 m 同时出现的概率分别为 4.5%、2.9%、1.7% 和 0.9%。由于台风暴潮对海岸地区产生的海洋灾害往往是高潮与大浪共同造成的, 单纯采用警戒水位的概念, 难以全面反应台风暴潮在海岸地区的成灾特点, 使人们对灾情大小的理解产生偏差。例如, 有时虽然产生台风暴潮增水, 潮位很高, 若波高不大, 则造成的灾害也不会很大; 相反亦然。因此, 同时考虑水位与波高对海岸地区的影响, 计算二者的同现概率, 可以得到相应致灾台风的重现期, 根据其出现概率的大小能够推断台风对受灾地带可能造成损失的程

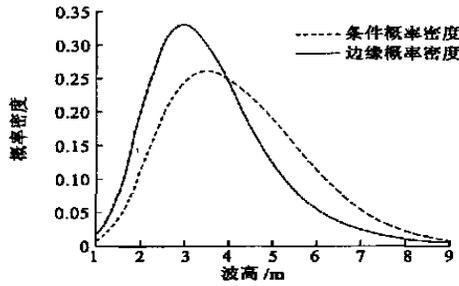


图 5 水位为 50 年一遇时，波高的条件概率密度图

Fig. 5 Conditional pdf of wave height when water level is 50-year return value

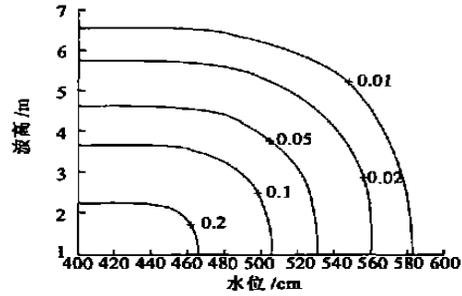


图 6 联合概率等值线

Fig. 6 Joint probability contour

表 1 所示为青岛地区 3 次特大台风风暴潮灾害时，极值水位与相应波高的联合出现概率。从表 1 看到，9711 号台风风暴潮过程中，极值水位与波高同时出现的概率为 0.9%，即台风风暴潮的重现期约为 110 年。另有 2 次台风风暴潮（4908 和 8114），虽然潮位较高，但是相伴出现的波高相对较小，因而潮、波联合概率较大，重现期为 20 ~ 30 年。

表 1 极值水位与波高联合概率

Table 1 Joint probability of extreme water level and wave height

台风编号	极值水位 / cm	波高 / m	联合概率 / %	重现期 / a
8509	531	5.5	1.29	78
9216	548	5.0	1.06	94
9711	551	5.2	0.90	111
4908	525	2.5	5.14	19
8114	529	3.6	3.20	31

### 3 结 语

(1) 提出了泊松-二维冈贝尔逻辑分布，该模式可以通过边缘分布和相关参数的估计获得，适用于海岸地区致灾台风风暴潮的长期概率预测。

(2) 对青岛地区的特大台风风暴潮灾害进行了随机统计分析，克服了单纯采用警戒水位值来判别沿海地区台风风暴潮灾情偏差较大的不足。计算显示，1949 年以来，青岛地区 9711 号台风风暴潮的重现期约为 110 年，而 9216 和 8509 号台风风暴潮的重现期稍短，分别接近 95 年和 80 年。此结论对青岛地区的防潮减灾规划和工程建设具有重要意义。

(3) 泊松-二维冈贝尔逻辑分布的普遍适用性尚需更多的实测数据进行验证和完善，使之用于海岸地区的防潮工程设计。

#### 参考文献：

[1] 乐肯堂. 青岛风暴潮灾害风险评估若干结果的分析[A]. 胡 政, 孙昭民. 灾害风险评估与保险[C]. 北京: 地震出版社, 1999. 56 - 63.

[2] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications (2nd ed) [M]. New York: John Wiley, 1957.

[3] Liu T F, Ma F S. Prediction of extreme wave heights and wind velocities[J]. J Wtrwy, Port, Coast and Ocn Eng, 1980, 106(WW4): 469 - 479.

[4] Liu T F. Long term distributions of hurricane characteristics[A]. Proc Offshore Technology Conference[C]. New York: ASME, 1982. 305 - 313.

[5] Langley R M, El-Shaarawi A H. On the calculation of extreme wave heights: a review[J]. Ocean Eng, 1986, 13(1) :93 - 118.

[6] Kirby W H, Moss M E. Summary of flood-frequency analysis in the United States[J]. J Hydro, 1987, 96: 5 - 14.

- [7] Tsimplis M N, Blackman D. Extreme sea-level distribution and return periods in the Aegean and Ionian Seas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1997, 44: 79 - 89.
- [8] 董 胜, 李奉利, 孙瑞文. 风暴增水随机分析的过阈法及其统计计算模式[J]. *青岛海洋大学学报*, 2000, 30(3): 542 - 548.
- [9] Liu D F, Wen S Q, Wang L P. Poisson-Gumbel Mixed compound distribution and its application[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(22): 1901 - 1906.
- [10] Gumbel E.J. Multivariate extreme distributions[J]. *Bulletin of the International Statistical Institute*, 1960, 39(2): 471 - 475.

## Long term distribution of disaster-caused typhoon storm surges in the coastal area<sup>\*</sup>

DONG Sheng, HAO Xiao-li, LI Feng, LIU De-fu

(*College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266071, China*)

**Abstract:** On the basis of observed tide level and the wave height series sampled from typhoon processes in Qingdao area since 1949, a Poisson Bi-variable Gumbel Logistic distribution (PBGL) is put forward for statistical analysis of storm events. The PBGL model, different from the traditional warning stage method, is more capable of describing the combined effect of environmental loads, such as tide level and the concomitant wave height. The return periods are estimated for several most serious typhoons occurring in the mentioned coastal area. The results indicate that the proposed model will be suitable for representing the joint probability distribution of correlated water level and wave heights occurring in typhoon processes. The final conclusions are presented for reference when the government departments make a storm-prevention program.

**Key words:** coastal area; disaster-caused; typhoon storm surge; Poisson Bi-variable Gumbel Logistic distribution; long term distribution; return value

---

\* The project is supported by the 10th Five-Year Plan Key Project of China (No. 2001BA80306) and the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of China, State Education Ministry.