

可能最大风暴潮风险评估中各等级热带气旋设定方法

李颖^{1,2,3}, 方伟华^{1,2,3}, 林伟^{1,2,3}, 叶妍婷^{1,2,3}

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学民政部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875)

摘要: 可能最大热带气旋的设定是可能最大风暴潮计算的基础, 对风暴潮灾害应急疏散具有重要意义。利用 1949~2011 年中国气象局(CMA)西北太平洋热带气旋最佳路径数据集、美国联合台风预警中心(JTWC)以及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)最大风速半径数据集, 基于各等级热带气旋参数之间的定量关系, 建立了各等级可能最大热带气旋最大风速、中心气压、最大风速半径、移动速度、移动方向等参数设定及路径合成的方法。以福建省连江县为例, 按照台风、强台风及超强台风强度等级, 分强度衰减和不衰减 2 种情况, 设定 3 种移动方向, 合成了共 216 场热带气旋作为可能最大风暴潮的计算输入。另外, 对参数敏感性、风场参数设定、参数设定与计算量的关系、叠加天文潮以及溃堤等问题进行了讨论。

关键词: 热带气旋; 可能最大风暴潮; 参数设定; 风险评估

中图分类号: P463.1; P47 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)04-0071-010

doi: 10.11759/hyxx20120829002

风暴潮灾害风险评估是风暴潮灾害管理的基础。我国濒临西北太平洋, 登陆我国的热带气旋频率高、影响范围广、突发性强, 其引发的热带风暴潮灾害经常造成严重的人员伤亡和财产损失^[1-3]。根据评估对象、方法及结果的不同, 风暴潮风险评估包括^[4]: (1)某点各多年一遇水平下风暴潮增水或水深评估, (2)某区域各多年一遇水平下风暴潮淹没水深及范围评估, (3)不同等级热带气旋下可能最大风暴潮淹没范围及水深评估, (4)风险评估与区划等。其中, 不同多年一遇水平评估产品可为工程设计、各类规划及保险产品等服务^[5], 而可能最大风暴潮则主要面向于热带风暴潮灾害的应急指挥、疏散避难、社区综合减灾等应用^[6]。

可能最大热带气旋(Probable Maximum Tropical Cyclone, PMTC)是一种假想的平稳状态的热带气旋, 它是根据可以在特定海岸地区发生最大持续风速所选择的气象参数值的组合^[7]。其中, 平稳状态是指热带气旋各气象参数相互约束且相互适应的状态。可能最大风暴潮(Probable Maximum Storm Surge, PMSS)是 PMTC 沿最不利途径逼近海岸的情景下产生的沿海各点的最大风暴潮增水及淹没。目前, 对于如何设定 PMTC 以计算 PMSS, 已开展了一系列研究。

美国对可能最大飓风(Probable Maximum Hurricane, PMH)及其引起的 PMSS 的研究开展早、理论

强、应用广。1959 年, 美国陆军工程兵团(USACE)在美国纳拉干海湾与新奥尔良地区开展了 PMH 研究^[8], 但仅重点考虑了中心气压; 随后, 出现了越来越多的 PMH 理论方法探索及区域应用研究, 例如, Wall 采用概率性方法设定可能最大飓风参数, 并依此评估了纽约杰弗森港口的 PMSS 增水^[9]; 美国核安全导则规定, 设定 PMSS 时应在可能最大飓风引起的增水基础上叠加 10% 的超高潮位并考虑海平面异常^[10]; 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)技术报告 NWS23 中提供了可能最大飓风的参数范围, 通过设定多种情景来组合飓风参数, 从而评估 PMSS^[11]。

2007 年, 美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)在 SLOSH Display Program(SDP)项目的支持下建立了最大可能增水产品(Maximum Envelope of Water, MEOW)^[6]。目前 NHC 已经在美国 37 个海区完成了 80 多个 MEOW 产品的计算及应用, MEOW 结果中某个点和其相邻点的最大增水可能是

收稿日期: 2012-08-29; 修回日期: 2013-04-11

基金项目: 公益性行业科研专项(201305020); 国家科技支撑项目(2012 BAK10B03)

作者简介: 李颖(1986-), 女, 山东淄博人, 博士生, 主要从事台风灾害风险评估研究, E-mail: ying.li@mail.bnu.edu.cn; 方伟华, 通信作者, 副教授, 主要从事自然灾害风险评估研究, E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

由不同合成路径的飓风产生的。用户虽然不知道是哪场飓风计算的最大增水,但是 MEOW 提供了 1 种在已知飓风强度等级前提下,综合考虑飓风路径预报不确定性、天文潮位叠加不确定性的最坏情景下的最大可能增水。

2003 年,日本内阁府联合其他风暴潮灾害管理部门,在多个研究机构支持下,编制发布了《海啸-风暴潮危险制图手册》,对 PMTC 参数的设定方法进行了说明^[12]。具体方法可分为 2 类,一是参照影响研究区的最严重风暴潮灾害的历史热带气旋;二是参照整个日本范围内造成过严重风暴潮灾害的热带气旋,一般选定 1959 年的伊势湾台风作为参照。另外,对较严重风暴潮的溃堤情景进行了粗略规范。

1991 年,中国国家核安全局发布了《核安全导则汇编》,在核电站设计基准热带气旋相关部分给出了 PMTC 参数的设定方法^[6],随后,其他研究针对广东阳江、江苏连云港等核电站附近或其他热带风暴潮易发地区 PMTC 相关水文气象参数进行了设定和计算^[13-15]。

虽然美、日、中三国均有一些 PMTC 方面的研究,但也存在着较大的差别:(1)美国在飓风路径参数设定上考虑的情景比较全面,主要有三个特点:一是考虑了不同飓风等级分别设定;二是考虑不同情景进行参数组合,并能计算出各种组合的概率;三是采用风暴潮数值模式对飓风参数进行敏感性分析,提高了设定结果的可靠性。(2)日本的 PMTC 设定方法有 2 个特点:一是对于最大风速、最低气压、最大风速半径、登陆方向、移动速度等参数的具体设定方法没有做出明确的规定,而是由地方政府依据本地区情况进行灵活设定;二是没有按照不同热带气旋等级分别计算制图,只是选择本地或者全国最坏的历史情景进行设定,部分原因是日本地处太平洋地震带,在全国很多地区海啸造成的淹没范围和水位要明显高于热带风暴潮。(3)中国的《核安全导则汇编》中的 PMTC 参数设定,具有 2 大特点:一是不考虑不同热带气旋等级分别进行设定;二是参数设定为最不利情况的组合,出现这种极端组合的概率非常小。

可以看出,我国以往的 PMTC 和 PMSS 研究,目的是为了核工程的绝对安全,其参数设定和计算没有针对不同等级的热带气旋。目前,我国地方政府越来越注重以人为本科学应对灾害,需要大范围地疏散转移沿岸居民并强制渔船进港、渔民上岸,但在确

定疏散规模时一些地区存在过度疏散情况,易导致灾害应对社会成本过高和行政资源浪费。2011 年“3.11”日本地震海啸后,国家海洋局开始组织开展国家、省、市、县等尺度的风暴潮灾害风险评估和区划工作,现已编制了《风暴潮灾害风险评估与区划技术导则(试行)》^[5],其中提出要对我沿海各县进行不同热带气旋等级的 PMSS 淹没范围和水深评估,为地方科学合理进行风暴潮灾害应急避难、转移疏散提供依据。

风暴潮增水大小通常与热带气旋强度、范围、移速、移向及下垫面情况有关。一般而言,最大风速越大、最大风速半径越广、登陆时移动方向越垂直于海岸,则风暴潮增水越大;中心最低气压对增水的直接影响则较小,气压越低增水越大;通常移动速度越小,海湾和河口地区增水越高、淹没范围越广,而移动速度越大则会使开阔海岸地区增水越高^[16-17]。另外,局地的岸线形状、海湾、河流、海岬及岛屿等地形作用、天文潮位、风场计算中的 Holland B 系数^[18]、溃堤情景等也会影响 PMSS 的计算。

据此,本文将结合中国沿海热带气旋及热带风暴潮的特点,综合考虑县尺度热带风暴潮风险评估所需的数据及技术要求,以福建省连江县为例,探索适合中国沿海县尺度可能最大热带风暴潮风险评估中的热带气旋热带参数设定方法,并给出具体的设定结果,为开展不同热带气旋等级的可能最大风暴潮淹没范围和水深评估工作提供参考。

1 资料处理

本文主要采用了中国气象局(CMA)热带气旋最佳路径数据集(1949~2011 年),其记录了西北太平洋热带气旋每 6 h 的时间(T)、中心经度(D_{lon})、中心纬度(D_{lat})、中心最低气压(P_{min})以及平均近中心最大风速(V_{max})等指标^[19],但是该数据集中未包含对热带气旋设定具有重要作用的登陆点相关参数。为此,本文利用登陆前后的数据进行了插值。首先,建立亚欧大陆较为光滑的海岸线作为热带气旋是否登陆的分界线,避免计算过程中由于实际海岸线过于复杂造成短时间内多次登陆的问题;其次,利用登陆前后的参数,从线性、抛物线、样条、三次样条及分形等函数形式中优选出不同参数的最佳插值方法,建立了自适应插值方法,对登陆点参数 T 、 D_{lon} 、 D_{lat} 、 P_{min} 、 V_{max} 等进行插值,并计

算了移动速度(V_t)和移动方向(θ), 详见文献[20]。

由于最大风速半径 R_m 实测数据较少, 本文还使用了两组包含 R_m 的数据集。一是美国联合台风预警中心(JTWC)最佳路径数据集(2001~2011年)^[21], 二是NOAA西北太平洋飞机探测台风资料(1960~1974年), 记录了173个热带气旋的 P_{min} 及 R_m 数据^[11]。所有数据集在使用前均将单位转换为与CMA一致。其中, 由于CMA数据集中 V_{max} 为2 min最大平均风速, 而JTWC中为1 min最大平均风速。为此, 参照世界气象组织标准及已有研究^[22-23], 对2 min与1 min的平均风速进行了转换, 转换关系为2 min最大平均风速等于1 min最大平均风速减去0.91 m/s。除特别指出外, 下文 V_{max} 均指2 min最大平均风速。

CMA、JTWC和NOAA是西北太平洋热带气旋历史数据收集最为权威的机构, 在整编上述数据集中均进行了数据质量及一致性检验。

2 参数设定方法

根据PMSS与PMTc参数之间的关系, 为了达到PMSS要求, 确定PMTc参数设计步骤如下:
 (1)基于热带气旋等级标准确定各等级PMTc的最大风速;
 (2)根据中心气压、最大风速半径与最大风速的经验统计关系, 结合已设定的最大风速, 在约束条件下尽可能提高中心气压差、最大风速半径的设定值;
 (3)鉴于移动速度对PMSS的影响与热带气旋路径所经历的局地地形有很大关系, 分情况给出参考建议;
 (4)设定与计算量关系较为密切的指标大小, 包括移动方向多少、路径间距的大小、是否考虑衰减等, 在计算能力满足的情况下, 尽量增加多种移动方向、缩小路径间距及考虑衰减情况。基于历史观测数据, 分析热带气旋主要参数(D_{lon} 、 D_{lat} 、 V_{max} 、 P_{min} 、 R_m 、 V_t) (图1)之间的定量关系, 结合其对风暴潮增水的影响^[16-17], 进行PMTc参数组合设定。

2.1 登陆参考点

为了对研究区内及附近的历史热带气旋参数进行特征统计, 或者对合成路径的参数进行设定, 需要确定一个基准点作为热带气旋登陆参考点(Central Reference Point, CREF)。CREF一般选择位于研究区光滑后的海岸线的中间位置, 并根据沿海海岸线及岛屿分布情况进行适当调整。图1给出了中国沿海光滑处理后的海岸线、沿海240个市(县)行政边界以

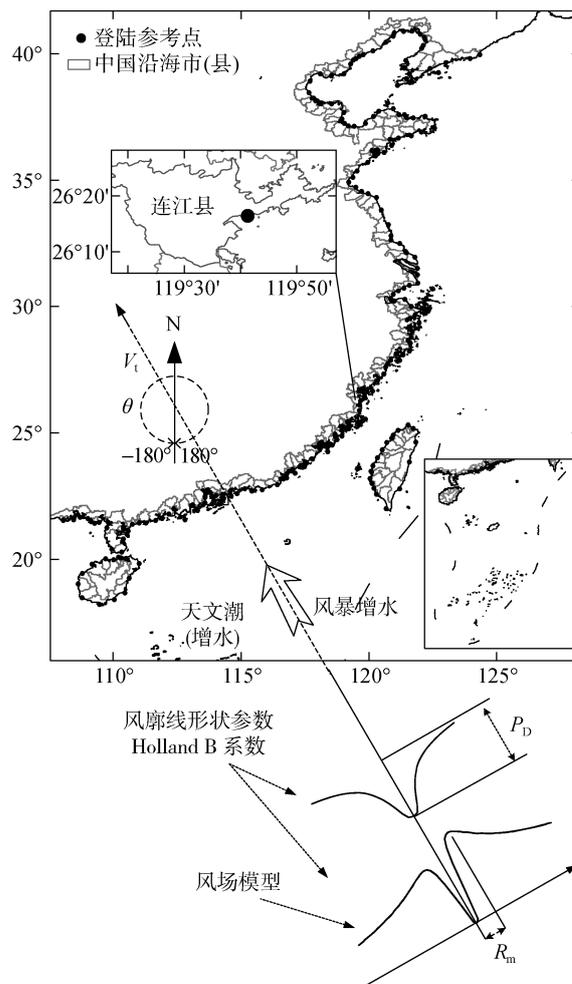


图1 中国沿海各市(县)CREF分布、福建连江县位置及PMTc参数示意图

Fig. 1 CREF for China's coastal cities (counties), location of Lianjiang County, Fujian Province and schematic diagram of PMTC parameters

及各市(县)CREF分布。其中, 大陆沿海203个市(县), CREF共209个; 海南省沿海13个市(县), CREF共13个; 台湾省沿海24个市(县), CREF共24个。

2.2 最大风速

热带气旋其他参数不变时, V_{max} 越大引起的风暴潮增水越大, 因而, 可以将各等级PMTc的 V_{max} 设为该等级 V_{max} 的上限值, 即热带低压 17.1 m/s, 热带风暴 24.4 m/s, 强热带风暴 32.6 m/s, 台风 41.4 m/s, 强台风 50.9 m/s^[24]。

由于超强台风 V_{max} 没有上限, 其设定应考虑PMSS风险评估成果的应用特点, 并结合研究区及附近历史热带气旋的 V_{max} 来综合判定。例如, 一是考虑西北太平洋所有历史热带气旋登陆点的 V_{max} 的最大值(1949~2011年为54.03 m/s); 二是考虑研究区

CREF 附近范围内历史热带气旋登陆点的 V_{max} 的最大值; 三是考虑 CREF 附近不同重现期(如 200 a 一遇)下的 V_{max} 。

2.3 中心气压差

首先, 找出 V_{max} 与 P_{min} 之间的经验关系。热带气旋中心压差 P_D 是外围气压 P_n 与 P_{min} 的差值。 P_D 与 V_{max} 有着很强的相关性, Atkinson 和 Holliday^[25]于 1977 年对西北太平洋热带气旋的风压关系进行了拟合(公式(1)), 其中 A 、 B 为经验参数。另外, 在探讨风压关系时也有研究考虑了纬度、 V_t 等因素的影响^[23, 26]。

$$V_{max} = A(P_n - P_{min})^B \quad (1)$$

本文利用 CMA 数据集所有样本对风压关系进行了拟合, 如公式(2)所示, 其中, R 为相关系数, 通过 V_{max} 推算出 P_D (图 2)。

$$P_D = 0.1056V_{max}^{1.6001}, R^2 = 0.7985 \quad (2)$$

其次, 比较登陆点 P_D 的历史观测值与平均经验值之间的关系。分析 1949~2011 年登陆点风压资料, 可以看出, 平均经验值加上历史观测值的 1 倍标准差(20.77)后, 结果不仅一般均大于历史登陆点观测值的最高值, 而且正好位于其附近(图 2)。

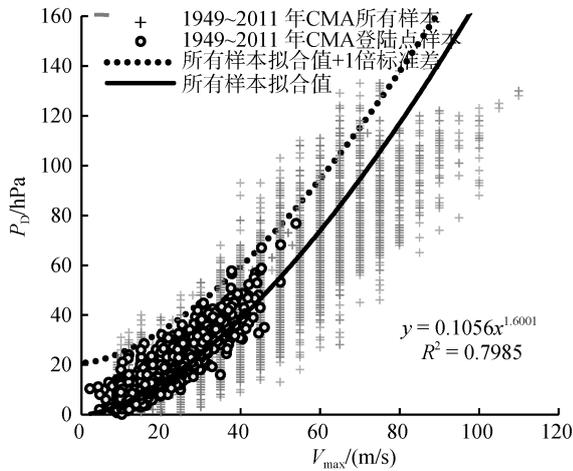


图 2 西北太平洋热带气旋 P_D 与 V_{max} 关系图

Fig. 2 Relationship between P_D and V_{max} for cyclones in the Western North Pacific

最后, 利用历史观测值与平均经验值之间的关系, 设定 P_{min} , 如公式(3)所示, 其中 S_D 为 1 倍方差, P_n 取为 1 008 hPa。

$$P_{min} = P_n - (0.1056V_{max}^{1.6001}) + S_D \quad (3)$$

2.4 最大风速半径

首先, 绘制 R_m 与 V_{max} 之间的散点图。通常采用经验拟合法利用 V_{max} 估算 R_m , 也有一些研究采用逐

步回归法利用 P_D 及纬度等参数估算 R_m ^[27-28]。本文对 V_{max} 和 R_m 之间的关系进行了探索, 总的规律为 V_{max} 越大时 R_m 越小(图 3), 但同时可以看出相关性非常弱。

其次, 找出 R_m 的最大值与 V_{max} 之间的经验关系。设定 PMTC 的 R_m 时, 重点研究最大值而非平均值。由图 4 可以看出, 热带气旋 R_m 的最大值与 V_{max} 具有较好的线性关系(公式(4)):

$$R_m = -0.3587V_{max} + 82.674, R^2 = 0.732 \quad (4)$$

然后, 比较 R_m 最大值的观测值与平均经验值之间的关系。利用拟合曲线加 1 倍标准差(21.37 km), 同 D_p 类似, 其值也均高于历史观测值且位于其附近(图 4)。

最后, 利用公式(5)设定 PMTC 登陆点的 R_{m0} 。

$$R_m = -0.3587V_{max} + 82.674 + S_D \quad (5)$$

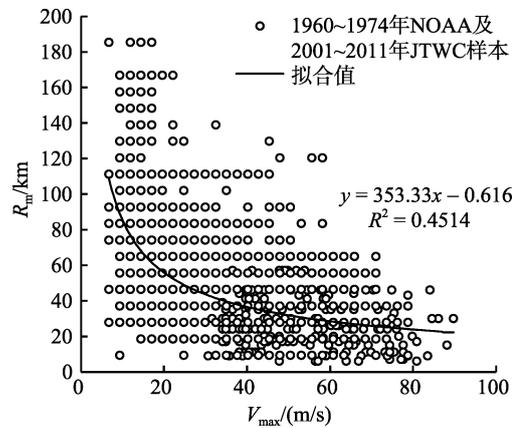


图 3 西北太平洋热带气旋 R_m 与 V_{max} 散点图

Fig. 3 Relationship between R_m and V_{max} for tropical cyclones in the Western North Pacific

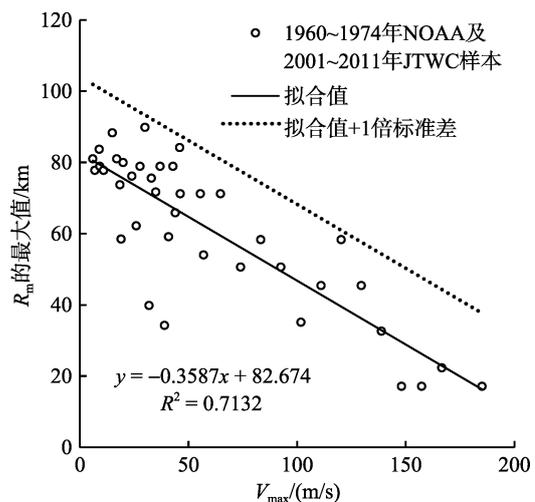


图 4 西北太平洋热带气旋 R_m 的最大值与 V_{max} 关系图

Fig. 4 Relationship between maximum R_m and V_{max} for tropical cyclones in the Western North Pacific

2.5 移动速度

首先, 探索 V_t 与强度、纬度等参数的关系。根据 CMA 资料统计, V_t 与 V_{max} 、 P_{min} 等强度变量关系不大。考虑到 V_t 受地转偏向力和大气环流影响较大, 与其本身所处纬度关系密切^[29-30]。由此, 本文对以 5° 为间隔的各纬度带内登陆点的平均移速进行了统计(表 1)。

表 1 西北太平洋热带气旋登陆点 V_t 分纬度统计结果
Tab. 1 Statistical results of translating velocity V_t of landing tropical cyclones in the Western North Pacific indifferent latitudes

纬度 (°N)	V_t (km/h)				样本量 (个)
	平均值	最大值	最小值	标准差	
5~10	19.60	32.37	12.91	7.58	10
10~15	20.46	37.19	6.19	6.68	76
15~20	19.90	35.60	5.13	6.19	139
20~25	18.25	37.17	1.79	6.83	511
25~30	21.29	46.50	5.80	8.50	122
30~35	23.62	53.78	9.93	8.78	52
35~40	28.70	54.83	9.93	12.17	51
40~45	38.97	60.43	21.20	13.18	9
45~50	49.12	60.04	31.11	13.84	5
50~55	36.07	41.85	26.49	5.36	9

其次, 参考各纬度带内 V_t 的统计结果, 设定登陆点。移动速度大, 可造成较大的风暴增水极值, 而移动速度小持续时间较长的热带气旋, 也可能导致较大的淹没范围。考虑到 V_t 本身波动较大, 为减少 PMSS 估算的不确定性, 特定区域 PMTC 的 V_t 应通过敏感性分析来确定。但为便于实际应用, 一些研究根据 P_D 设定了 V_t 上下限^[7, 11], 或将 V_t 设为区域样本最大值^[13]或者平均值^[15, 31]。本文案例中将 PMTC 的 V_t 设为研究区历史记录的平均值。

2.6 移动方向

首先, 探索登陆时 θ 与强度等参数间的关系。 θ 与 V_{max} 、 R_m 等参数没有显著相关关系, 而更多受引导气流的影响^[32]。因此设定 θ 时, 不考虑其与热带气旋其他参数之间的关系。

其次, 对热带气旋登陆 θ 进行频率分析。由于历史观测样本较少, 本文采用 Chouinard 方法分析^[33], 实质为以高斯核函数对在距 CREF 点一定空间范围内的历史样本进行插值, 从而得到各方向热带气旋登陆频次(公式(6)、(7)、(8))。其中, λ 为热带气旋频次, 表示一定方向(如 1°)、一定距离(如 1 km)、一定

时间(如图 1 a)范围内热带气旋登陆的次数。 w 为权重, 是距离热带气旋中心的距离和角度的函数。 θ_i 为第 i 个样本点的移动方向, h_d 为最优距离窗宽, h_θ 为最优角度窗宽。

$$\lambda(\theta) = \frac{1}{T} \sum_i w(d_i)w(\theta_i - \theta) \quad (6)$$

$$w(d_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_d} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{d_i}{h_d}\right)^2\right] \quad (7)$$

$$w(\theta_i - \theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_\theta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta_i - \theta}{h_\theta}\right)^2\right] \quad (8)$$

然后, 分析最有利于造成研究区内风暴潮增水的 θ 。根据历史风暴潮资料, 或者采用数值模式计算, 对热带风暴潮增水对登陆时 θ 的敏感性进行分析, 确定最有利于风暴潮增水的 θ 。

最后, 确定 θ 间隔并设定登陆 θ 列表。综合考虑登陆 θ 频率分布、最有利风暴潮增水的 θ 后, 既可以采用等间距设定 θ , 也可以在增水对登陆 θ 比较敏感的角度多设定一些方向。

2.7 路径间距

为保证最大风暴潮淹没水深空间分布的合理性, 首先, 所设定的路径间距要足够小, 才能保证热带气旋路径对模拟区域的平滑覆盖, 若路径间隔太远, 则可能导致风暴潮增水估算结果波动较大, 从而低估模拟风暴潮的峰值增水出现的可能性。其次, 若路径间距设定过小则会导致模拟次数过多, 带来较大的计算成本, 影响 PMSS 风险评估效率。已有研究表明, 当路径间距设定为 R_m 时, 已能得到较好的评估结果^[32]。另外, 由于热带气旋的右侧风速更大, 所引起的风暴潮更强, 因而主路径方向左侧设定的路径数量一般应略多于右侧, 若研究区附近热带气旋不对称性越高, 则两侧路径数量差异越大。

因此, 应综合考虑敏感性及计算能力进行路径间距设定, 路径间距设定值应不大于 R_m , 在计算能力允许的条件下, 可适当减小路径间距设定值。

2.8 强度衰减

若假设热带气旋登陆前后无衰减, 对 PMTC 各路径点参数进行简化设定, 则各路径点 P_{min} 、 V_{max} 、 R_m 等特征参数可设定为与 CREF 一致。

实际热带气旋登陆前后受陆地影响, 其强度会从登陆前一定距离开始衰减。如果考虑衰减, 可根据研究区历史热带气旋实际情况, 分洋面衰减和陆地衰减两部分进行设定:

首先, 设定洋面强度衰减系数。热带气旋在登陆前一个时段, P_D 、 R_m 均呈较明显的线性变化趋势^[32]。例如, 美国墨西哥湾的研究表明, 距离海岸约为 90 n mile 时的 R_m 约为登陆时 R_m 的 1/1.3 倍, 而 P_D 的衰减系数与登陆点 R_m 有关^[32]。由于离岸较远的强度变化与当时的环境有关, 具有一定的随机性, 可设定为最多增强至某一强度(如 V_{max} 约 70 m/s)处即可。

其次, 设定登陆强度衰减系数。热带气旋登陆后, P_D 随时间呈指数衰减^[34-35], 其衰减规律近似符合以下关系(公式(9)), 其中, P_{D0} 为登陆点中心气压差; T 为登陆后时间; a 、 c 为常参数。

$$P_D = -cP_{D0} \cdot e^{-aT} \quad (9)$$

最后, 设定各路径点强度参数。根据洋面衰减系数及登陆后衰减系数, 计算每个时间间隔的 P_D 衰减量, 从登陆点开始推算各路径点的 P_{min} 、 V_{max} 、 R_m 等。

2.9 路径合成

在热带气旋参数确定后, 再通过设定起始点及终止点位置、时间分辨率等, 即可合成整条路径。具体设定步骤如下:

首先, 设定起始点位置。起始点设定于登陆点前移路径的相反方向, 其与登陆点的距离由选用的风暴潮模式的计算能力决定, 通常应不小于 90 n mile^[32], 且设定时要覆盖风暴潮数值模式计算的网格范围。

其次, 设定终止点位置。热带气旋登陆后对沿岸风暴潮的影响逐渐减小, 终止点处的热带气旋所引起的风暴增水应足够小, 例如可以设定为登陆后 300 km 终止。

然后, 设定路径点时间间隔。一般情况下, 可与最佳路径集中一致设定为 6 h, 也可以设定为更密的时间间隔。

最后, 组合所有参数。根据热带气旋 V_t 和 θ , 计算每个时间间隔的移动距离, 根据各参数随与登陆点距离的变化规律, 从登陆点组合参数推算出整条合成路径的所有组合参数。

为了自动组合参数形成合成路径, 本文开发了一个自动化程序, 输入 CREF、登陆参数、路径点时间间隔、起始点及终止点位置, 即可以 GIS 格式或者文本格式输出所有合成路径^[36]。

3 参数设定示例

福建省受热带气旋灾害严重, 2001~2010年间因

热带气旋灾害造成的直接经济损失达606.23亿元^[37]。福州市连江县是福建东部沿海受热带气旋及风暴潮影响较大的县(图1)。本文将以连江县为例, 给出 PMTC 的参考设定。

1) 确定设定强度等级及研究区 CREF。由于连江县热带低压、热带风暴和强热带风暴所引起的风暴潮增水相对较小, 本文仅以台风、强台风、超强台风三个等级为例设定参数。连江县海岸线长、岛屿众多, 结合热带气旋主要登陆方向, 近似取其东南部海岸线中点(119.7°E, 26.28°N)作为 CREF。

2) 设定 PMTC 登陆时的参数。

台风、强台风的 V_{max} 、 P_{min} 、 R_m 可依据前文进行设定, 另外, 综合考虑西北太平洋登陆点 V_{max} 历史最大值、连江县附近历史最大值(50.13 m/s), 以及连江县不同重现期下的 V_{max} (图 5), 连江县超强台风的 V_{max} 设定为 60 m/s。由 V_{max} 进而设定 P_{min} 及 R_m (表 2)。

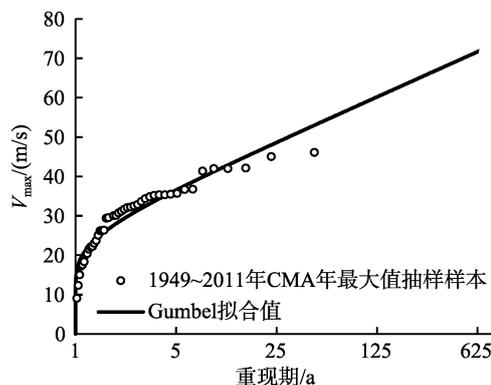


图 5 连江县热带气旋不同重现期下 V_{max} 曲线

Fig. 5 V_{max} of tropical cyclones at different return periods for Lianjiang County

表 2 连江县台风、强台风及超强台风 PMTC 参数设定表
Tab. 2 PMTC parameters of typhoon, severe typhoon, and super typhoon scales for Lianjiang County

台风强度	V_{max} (m/s)	P_{min} (hPa)	R_m (km)	V_t (km/h)	$\theta(^{\circ})$
台风	41	946.4	118.8	21.29	-5, -65, -125
强台风	51	930.4	122.5	21.29	-5, -65, -125
超强台风	60	913.3	125.5	21.29	-5, -65, -125

考虑连江县特殊的地理位置, 一方面由于热带气旋主方向为 -65° (图 6), 南岸易受风暴潮侵袭, 另一方面, 一旦热带气旋从东北方向来袭, 恰使潮水涌入罗源湾, 则会造成较大的增水和淹没。综合考虑, 设定 PMTC 的登陆 θ 为以历史热带气旋主方向为基准, 以 60° 为间隔, 即 θ 可取为 -125° 、 -65° 和

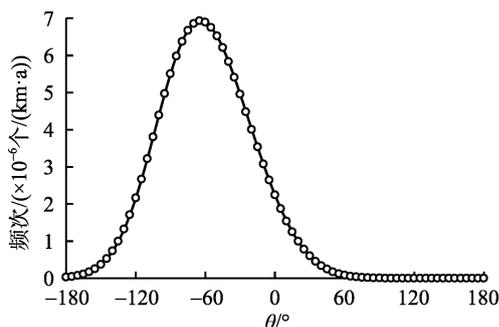


图 6 1949~2011 年连江县 CREF 附近 140 km 内热带气旋登陆 θ 频次分布图

Fig. 6 Directional rate of translating direction θ for tropical cyclones landing near the CREF(with in 140 km) in Lianjiang County

-5°。另外，参照 25°~30°N 纬度带内登陆热带气旋的 V_t 历史平均值，设定 V_t 为 21.29 km/h。

3) 分别针对无强度衰减和强度衰减两种情况，确定各路径点 P_{min} 、 V_{max} 和 R_m 。

不考虑强度衰减情况下，各路径点参数设定与登陆时设定一致。

考虑强度衰减情况进行参数设定。首先，设定 P_{min} 。登陆前，结合登陆点 R_m ，各等级下 P_{min} 变化速率(即登陆前靠近 CREF 1 km 所增加的气压值)分别为：台风 0.2603 hPa/km，强台风 0.2688 hPa/km，超强台风

0.2769 hPa/km，设定由 CREF 向海上路径点按此速率线性增强至 884.56 hPa(相当于 V_{max} 达 70 m/s)，然后强度保持不变。登陆后，假设强度依照历史平均衰减速率衰减，具体地，基于连江县附近历史登陆点样本，利用公式(9)拟合每场热带气旋参数，进而计算 a 、 c 平均值，分别为 0.022 172 8 和 0.689 49。其次，结合公式(3)，根据 P_{min} 反算 V_{max} 。最后，设定 R_m 。各等级下 R_m 线性变化速率表示登陆前靠近或登陆后远离登陆点 1 km 时，热带气旋最大风速半径所减小的量值(km)的结果分别为台风为 0.548 7，强台风为 0.564 4，超强台风为 0.579 5。

4) 设定合成路径的时间精度和空间密度，合成路径。设定沿移动方向的反方向距 CREF 约 600 km 处为起始点，登陆后约 300 km 处路径终止；考虑强度无衰减情况和强度衰减两种情况；设定时间间隔为 1 h、路径间距为 23 km(约为平均 R_m 一半)；对每一种参数组合，设定路径 12 条，其中主路径 1 条、主路径左侧 6 条、右侧 5 条。对台风、强台风及超强台风等级下共 216 条 PMTC 路径进行合成(图 7)。以台风等级为例，在不考虑衰减的情况下，计算图 7 中无衰减情况下的 36 场热带气旋的风暴潮淹没范围及水深，则 PMSS 淹没范围取值为 36 场风暴潮的所有淹没范围，水深取值为 36 场风暴潮中的最大水深。

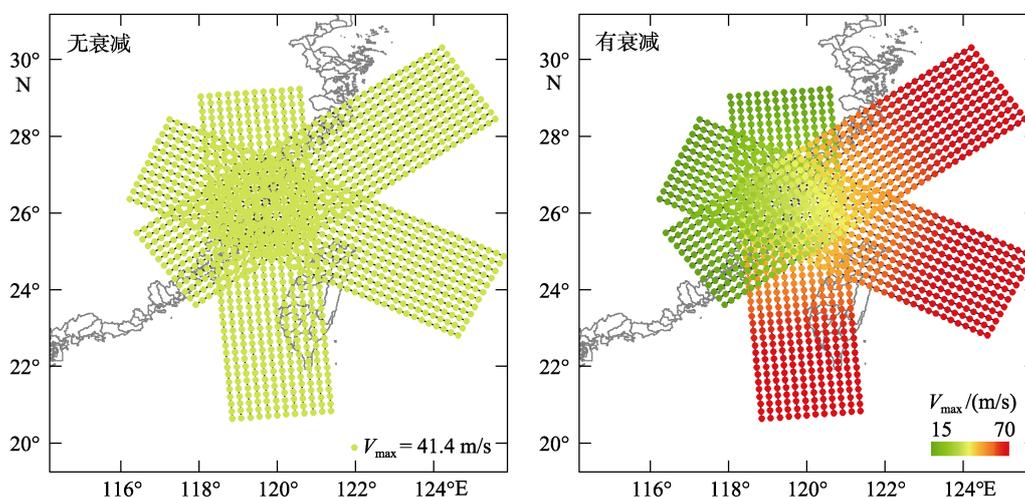


图 7 连江县热带气旋(强度等级为台风)PMTC 合成路径结果

Fig. 7 Synthetic tracks of tropical cyclones at typhoon scale in Lianjiang County

4 结论及讨论

4.1 结论

PMTC 的设定是 PMSS 计算的基础，但目前国内不同等级 PMTC 设定方法研究较少。基于 1949~2011

年间影响中国的热带气旋关键参数统计，探讨了可能最大热带气旋参数设定方法，主要结论如下：

1) 基于各等级热带气旋参数之间的定量关系，建立了各等级可能最大热带气旋的最大风速、中心气压、最大风速半径、移动速度、移动方向等参数

设定及路径合成方法。

2) 设定方法在福建省连江县台风、强台风及超强台风等级下合成路径结果表明,该方法可行有效。

4.2 讨论

PMSS 的计算还需要考虑一些其他问题,讨论如下:

1) 主要热带气旋参数敏感性分析。在各等级 PMTC 给定 V_{\max} 、 P_{\min} 等强度变量下,不同热带气旋的 V_t 及 θ 对风暴潮增水影响差异较大^[17],同时,不同研究区风暴潮增水也会受当地海岸线分布、地形等因素影响而呈现异质性。因此,采用风暴潮数值模式,针对研究区开展风暴潮增水对 PMTC 的参数敏感性试验,确定区域最适参数是下一步 PMSS 研究重点。

2) 参数设定与计算量关系。对热带气旋强度等级及各种相关参数设定时应考虑计算量,例如,减小路径间隔及 θ 间隔、设定更远的起算和终止距离会有助于 PMSS 的计算结果精度的提高,但是一方面会增加热带气旋场次,另一方面会增加热带气旋持续时间,从而增加风暴潮数值模式的总计算量,可综合衡量评估精度需求及计算能力设定参数。

3) 热带气旋风场参数设定。表征风速径向分布形状的 Holland B 系数等对热带气旋风场以及风暴潮增水的计算有重要影响,在计算 PMSS 时尽量选择能反映 Holland B 系数特点的经验风场模型。

4) PMSS 计算中的其他参数设定。实际潮位不仅与 PMTC 引起的增水有关,还与天文潮位相关,在实际计算时需考虑天文潮,另外还应考虑沿海防御能力并进行溃堤情景设定等。

致谢: 国志兴、谭骏、吴维登、陈延盛等参加了可能最大风暴潮计算的相关讨论,王喜年提供了部分最大风速半径数据,吴小宁协助了部分制图工作,两位匿名评审人给出了有益的修改建议,特表感谢。

参考文献:

- [1] 王喜年. 风暴潮灾害及其地理分布[J]. 海洋预报, 2001, 18(2): 70-77.
- [2] 王喜年. 风暴潮风险分析与计算[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 73-76.
- [3] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴(2010)[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [4] Resio D T, Irish J, Cialone M. A surge response

function approach to coastal hazard assessment – Part 1: Basic concepts[J]. Nat Hazards, 2009, 51: 163-182.

- [5] 国家海洋局, 风暴潮灾害风险评估和区划技术导则(试行)[R]. 北京: 国家海洋局, 2012.
- [6] Glahn B, Taylor A, Kurkowski N, et al. The role of the slosh model in national weather service storm surge forecasting[J]. National Weather Digest, 2009, 33(1): 3-14.
- [7] HAD101/11. 核电厂设计基准热带气旋[S]. 国家核安全局, 1991.
- [8] Harris D L. An interim hurricane storm surge guide[R]. Washington: Weather Bureau Department of Commerce, 1959.
- [9] Wall. Probabilistic assessment of flooding hazard for nuclear power plants[J]. Nuclear Safe, 1974, 15(4): 399-408.
- [10] Regulatory Guide 1.59-1977, Design basis flood for nuclear power plants (revision 2)[S]. Washington D.C.: US Nuclear Regulatory Commission.
- [11] Schwerdt R W. Meteorological criteria for standard project hurricane and probable maximum hurricane windfields, Gulf and East coasts of the United States[R]. Washington D.C.: US Department of Commerce, 1979.
- [12] 津波・高潮ハザードマップ研究会事務局. 津波・高潮ハザードマップマニュアル(案)[EB/OL]. [2003-12-16]. http://www.mlit.go.jp/kowan/hazard_map/5/shiryu2.pdf.
- [13] 尹庆江, 王喜年, 吴少华. 镇海可能最大台风增水的计算[J]. 海洋学报, 1995, 17(6): 21-27.
- [14] 吴少华, 王喜年, 于福江, 等. 连云港温带风暴潮及可能最大温带风暴潮的计算[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 8-18.
- [15] 赵鑫. 钱塘江北岸可能最大热带气旋引起的风暴高潮位研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [16] Rego J L, Li C. On the importance of the forward speed of hurricanes in storm surge forecasting: A numerical study[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36: L07609, doi: 10.1029/2008GL036953.
- [17] Peng M S, Jeng B F, Williams R T. A numerical study on tropical cyclone intensification. Part I: Beta effect and mean flow effect[J]. Journal of the Atmospheric

- Sciences, 1999, 56: 1404-1423.
- [18] Niedoroda a W, Resio D T, Toro G R, et al. Analysis of the coastal Mississippi storm surge hazard[J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37: 82-90.
- [19] 中国气象局. CMA-STI 热带气旋最佳路径数据集(1949-2011)[DB/OL].[2011-07-29]. <http://www.typhoon.gov.cn/index.php?controller=spage&pid=169>.
- [20] 李心怡, 方伟华, 林伟. 西北太平洋热带气旋路径及强度插值方法比较研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(2): 111-116.
- [21] JTWC. JTWC tropical cyclone best track data(2001-2011)[DB/OL]. [2013-05-26]. http://www.usno.navy.mil/NOOC/nmfc-ph/RSS/JTWC/best_tracks/wpindex.html.
- [22] Tropical Cyclone Programme (WMO/TD-No. 196). Typhoon committee operational manual[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2011.
- [23] 邹燕, 赵平. 几种台风资料的对比及台风年鉴数据的订正[J]. *热带气象学报*, 2009, 25(3): 295-299.
- [24] GB/T 19201-2006, 热带气旋等级[S].
- [25] Atkinson G D, Holliday C R. Tropical cyclone minimum sea level pressure maximum sustained wind relationship for the western north pacific[J]. *Monthly Weather Review*, 1977, 105: 421-427.
- [26] Knaff J A, Harper B A. Tropical cyclone surface wind structure and wind-pressure relationships[R]. La Reunion : WMO International Workshop on Tropical Cyclones-VII, 2010.
- [27] Vickery P, Skerlj P, Twisdale L. Simulation of hurricane risk in the U.S. using empirical track model[J]. *Journal of Structure Engineering*, 2000, 26(10): 1222-1237.
- [28] Willoughby H, Rahn M. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the holland (1980) model[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 3033-3048.
- [29] Chan J C-L. An observational study of the physical processes responsible for tropical cyclone motion[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1984, 41: 1036-1048.
- [30] Liang X, Chan J C L. The effects of the full coriolis force on the structure and motion of a tropical cyclone. Part I: Effects due to vertical motion[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 62: 3825-3830.
- [31] 董剑希, 仇天宇, 付祥, 等. 福建省沙埕港百年一遇台风风暴潮的计算[J]. *海洋通报*, 2008, 27(1): 9-16.
- [32] Toro G R. Joint probability analysis of hurricane flood hazards for Mississippi[R]. Boulder: Risk Engineering, Inc, 2008.
- [33] Chouinard L E, Liu C, Cooper C K. Model for severity of hurricanes in Gulf of Mexico[J]. *Journal of Waterway, Port and Ocean Engineering*, 1997, 123(3): 120-129.
- [34] Vickery P J. Simple empirical models for estimating the increase in the central pressure of tropical cyclones after landfall along the coastline of the United States[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44: 1807-1826.
- [35] Kaplan J, Demaria M. On the decay of tropical cyclone winds after landfall in the New England area[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40: 280-286.
- [36] Opencyclone(台风灾害风险模型)[DB/OL].[2003-12-16]. <https://github.com/OpenCyclone>.
- [37] 中国气象局国家气候中心. 全国气候影响评价[M]. 北京: 气象出版社, 2001-2010.

Parameterization of synthetic tropical cyclones at various scales for probable maximum storm surge risk modeling

LI Ying^{1, 2, 3}, FANG Wei-hua^{1, 2, 3}, LIN Wei^{1, 2, 3}, YE Yan-ting^{1, 2, 3}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resources Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, the People's Republic of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Received: Aug., 29, 2012

Key words: Tropical Cyclone; Probable Maximum Storm Surge; Parameterization; Risk Assessment

Abstract: The parameterization of Probable Maximum Tropical Cyclones (PMTTC) is of great importance to the computation of Probable Maximum Storm Surge (PMSS) for emergency evacuation planning at different scales of tropical cyclones. Based on the Best Track Dataset (1949-2011) of the western north pacific from CMA and other two databases, the radius of maximum wind from JTWC and NOAA, the quantitative relationships between the maximum winds and other parameters of various scales were analyzed and modeled. A method was developed to set maximum sustained wind, central pressure, radius of maximum winds, forward velocity and direction, and then to synthesize the full track with the above parameters. Taking Liangjiang County, Fujian province as an example area, 216 tropical cyclones were synthesized for tropical cyclones scaled at typhoon, severe typhoon and super typhoon, with decay and no-decay at 3 major directions. At last, parameter sensitivity, Holland B parameter setting, wind field parameter setting and computation resource requirement, astronomical tide, and dam failure, etc. were discussed.

(本文编辑: 刘珊珊 李晓燕)