

热带气旋降水模拟研究进展

李 颖^{1,2}, 方伟华^{1,2,3}

(1. 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; 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. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要:中国是遭受热带气旋灾害最为严重的国家之一, 准确的降水模拟对于开展热带气旋灾害风险评估有重要意义。本文从热带气旋灾害风险评估的视角, 将降水模拟分为基于极值理论的降水极值模拟、基于站点的降水时空模拟和基于热带气旋路径的降水事件模拟3大类; 根据风险评估对降水模拟的需求, 从模型构建、发展及其特点等方面对3类模型进行分析评述; 进而提出面向风险评估的热带气旋降水模拟, 应兼顾降水模拟的一般性和热带气旋暴雨模拟的特殊性, 平衡处理降水模拟结果的准确性、统计量的可靠性和计算量问题。以极值理论对降水极值模拟为基础, 充分发挥降水时空模拟在处理长时间降水序列中的优势, 并加强热带气旋降水的理论研究, 进一步完善热带气旋降水事件的模拟模型。

关 键 词:热带气旋; 降水模拟; 灾害; 风险评估

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.013

1 引言

热带气旋是一种生成于热带洋面的强烈气旋性涡旋, 强降水是热带气旋灾害的主要致灾因子之一, 并常引发洪水、滑坡、泥石流崩塌等次生灾害, 造成巨大经济损失及人员伤亡(Chen et al, 2010; Rappaport, 2000)。全球热带气旋的强度、频率和影响范围会随气候变化而改变(Trenberth et al, 2007), 预计到2050年受热带气旋灾害威胁的大城市人口将翻一番, 到2100年因气候变化而造成的热带气旋加剧所带来的经济损失将达280~680亿美元(World Bank, 2010)。灾害风险管理是符合减灾成本效益的有效措施。热带气旋灾害风险评估通过对潜在降水等致灾因子发生频次及强度、承灾体暴露性和脆弱性以及受灾程度进行估计, 可为保险费率厘定、防御工程设防标准设定、投入产出效益分析等提供科学依据。降水模拟则是热带气旋灾害风险评估的基础。

国内外学者在气象、水文等领域开展了大量降

水模拟工作, 部分研究已渗透至洪水风险评估领域。早期, 水文学家曾利用确定性的降雨径流模型进行洪水风险评估, 通常针对确定的单次降水过程进行。这种做法通常忽略了前提条件或环境背景, 可能导致风险评估结果差异很大, 例如一场暴雨对久旱或正常的河流造成的风险是不同的。因此, 极端洪水事件的风险应当在运行较长时间的连续降雨径流模型后进行评估。这就需要提供一个比较精细的时间分辨率(例如, 每小时)并结合空间变化的长期雨量数据记录。在实测数据通常不能满足需求的情况下, 需要进行降水随机模拟而得出符合时空分布规律的降水数据。以Coe等(1982)、Stern等(1984)、Rodriguez-Iturbe等(1987)和Wheater等(2005)为代表的统计学家、水文学家在降水时空模拟方面做了大量工作, 建立并发展了广义线性模型、点过程模型等; 中国的丁裕国等(2009)、廖要明等(2009)也在构建天气生成器方面做了诸多探索, 得到了较好的发展和应用。

但是, 专门针对热带气旋灾害风险评估应用的

收稿日期: 2012-09; 修订日期: 2012-11.

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

作者简介: 李颖(1986-), 女, 山东淄博人, 博士研究生, 主要研究方向为台风灾害风险评估。E-mail: ying.li@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 方伟华(1973-), 男, 湖北咸宁人, 博士, 副教授, 主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

降水模拟较少。在热带气旋灾害风险降水模拟中,兼顾降水的一般性和热带气旋暴雨的特殊性尤为重要。一方面,热带气旋路径的随机性大,可造成局地一次或多次受袭,使热带气旋影响地区降水空间分布的不确定性也较大。对一般洪水灾害而言,利用历史降水及可能最坏组合情景即可估算局地最大可能降水。但对于热带气旋降水致洪而言,整个降水带的空间格局会因路径的不同而改变,因此,风险评估需结合热带气旋长期路径变化规律开展综合研究。另一方面,热带气旋常与其他天气系统相互作用(Chen et al, 2010),加之其本身降水空间分布随机性大,最大降水、累积降水及降水历时等都存在较大不确定性。若对热带气旋降水不确定性估计不足,则会严重影响局地降水统计量估计及洪水过程线模拟的准确性,进而影响防御工程设防标准的合理性。例如,1975年8月深入河南的7503号台风恰逢大气环流形式调整,在北上途中于河南境内停滞少动,在特殊地形下引发了连续降水。由于历史上该地区未发生如此长时间的台风暴雨,加之当地设防标准较低,结果此次事件导致板桥及附近多处水库发生溃决漫溢,造成数万人伤亡(温克刚等, 2008)。

由于热带气旋暴雨成灾过程十分复杂,降水精确状态估算及预测还存在诸多困难。尽管数值模式已广泛应用于短期天气预报,但现阶段并不适合对热带气旋风险评估中降水场序列进行模拟。首先,由于对构建动力学模型的物理机制了解不充分和数值求解方法的缺陷,以及观测手段和观测时空精度的限制而导致初始条件的不准确等原因,随时间推移解的不稳定性增加(丑纪范, 2002),降水不确定性增加。虽然许多高精度(如2 km)的动力学模型有能力模拟出热带气旋在某一区域的降水型,但最大累积降水等要素仍并不能被准确预测,且随着时间的推移降水预报能力大大减弱,极大地影响了数值预报产品在防灾减灾中的应用(Cheung et al, 2008)。其次,数值模式的运算复杂,计算耗时长(范丽军等, 2005)。对于百年一遇或更长时段的风险评估所需要的样本量而言,计算量太大也是不容忽视的问题。

因此,热带气旋防灾减灾实践需要发展较为简便快捷、可定量计算的降水模型,计算降水统计量

的概率分布,以满足灾害风险管理和长期风险定量评估的需求。降水统计量概率分布通常可采用直接或间接方式获取。直接方式即采用统计模型计算统计量,目前基于极值理论的极值降水模拟是发展较为成熟且应用广泛的方法。间接方式则通过模拟仿真长时间序列的热带气旋降水样本来估计降水统计量,根据降水模拟单元的不同,可分为基于站点和基于热带气旋路径的降水模拟。本文将通过综述基于极值理论的降水极值模拟、基于站点的降水时空模拟和基于热带气旋路径的降水事件模拟的发展过程和模型特点,探讨其在热带气旋灾害风险领域的适用性,以期热带气旋灾害风险评估提供支持。

2 基于极值理论的降水极值模拟

极值理论(Extreme Value Theory)是一种关注概率分布中位于尾部事件的统计方法,常用于解决利用标准统计工具预测或估计极端和稀有事件时样本稀少的问题。

20世纪20年代,Fisher等(1928)在研究最大最小数的频率分布时最先提出了极值理论。根据样本的选取方式不同,其模型主要分为2类:①经典极值理论模型,包括Gumbel分布、Frechet分布和Weibull分布模型,后来被归纳为广义极值分布模型(General Extreme Value),往往通过选取一个时段(如年、月)中的最大或最小值作为样本;②广义帕累托分布模型,选取超过一定极限的所有数值作为样本,可充分有效地使用稀有极值样本。

目前,极值理论发展较为成熟且已逐步成为处理灾害问题的重要工具之一(Coles et al, 2003; McNeil, 1999)。以热带气旋降水为例,基于极值思想对历史站点数据进行统计分析,不需将降水的常规时间序列进行完整模拟,而可直接通过热带气旋引发的极端降水事件的概率分布估计危险性。特别对于样本稀少的巨灾而言,极值模拟是一种充分利用稀有样本、相对简单易行且能较好抓住问题本质的降水致灾危险性分析方法(Coles et al, 2003)。它通过极值降水模拟来反映超过一定阈值的致灾因子行为规律,进而可以反映百年、五百年、千年一遇甚至更稀有巨灾的发生概率。在热带气旋灾害危

险性及风险研究方面,中国学者应用极值理论做了许多有益探索(陈朝晖等, 2008; 石先武等, 2011; 武占科等, 2010)。例如,研究表明, Gumbel Copula 函数联合概率分布模型和极值 I 型联合概率分布模型较适合对上海地区台风大风和降水联合分布进行描述(武占科等, 2010); 在经典极值模型及广义帕累托分布模型中, Weibull 分布对于模拟中国台风极值降水整体效果较好(石先武等, 2011)。

但在区域风险的研究方面,极值降水模拟也存在很大的局限性:① 该方法对观测数据的依赖性很强,一般需要有较长的时间序列(如 30 年以上),而中国地面自动站大多数 2004 年之后陆续布设并投入使用,适合极值模拟的可靠站点数据较为有限;② 该方法很难将离散站点的极值降水序列合理转化到连续空间上,特别对有系统结构的热带气旋而言,单次过程降水与热带气旋降水的空间结构、站点距台风眼的位置、登陆时间、持续时间等密切相关,而一段时间(如年)内的极值降水与该地区的大气环流和环境有关,因而极值降水分布并不能通过简单的插值得到。

3 基于站点的降水时空模拟

基于站点的降水时空模拟方法,能够对历史样本进行随机模拟,生成符合统计规律的不同时间尺度的降水序列,并以样本本身或背景条件所反映的空间关系,在一定程度上解决降水的空间连续性问题。

降水场长期序列模拟实质上是构建一种类似降水随机天气生成器的模拟工具。所谓天气发生器,是研究某个地区天气或气候的一般特征,并根据这些统计特征模拟出该地区一年内逐日天气数据的随机模型(廖要明等, 2004),而模拟的时间长度与精度并不局限于年与日。自 20 世纪 60 年代以来,这类模型就用于洪水防御工程、水土保持等方面,以解决受观测降水资料时空精度、序列长度等限制而导致水文模型输入条件不足的问题。尽管应用于不同地区不同需求的随机模型千差万别,但其发展主要围绕以下两个问题:如何解决降水的时空连续性问题? 如何表达非平稳过程降水? 目前,模拟对象可为区域或站点降水,时间精度可达日、

次日、小时甚至分钟等;但如何处理季节差异问题、气候变化带来的趋势性和周期性问题,以及空间上如何处理海陆差异、地形等对降水影响等问题,一直是讨论的热点。

降水时空模型大致可分为广义线性模型、点过程模型、隐马尔科夫链模型以及非参数模型等。这些模型以反映降水序列整体的统计特征为主要目的,可较好地满足长期风险评估对降水模型的应用需求,但目前仍难以很好地反映热带气旋降水的空间分布以及由路径随机性带来的降水空间不确定性。

3.1 广义线性模型

广义线性模型(Generalized Linear Model),是將线性回归模型的因变量从正态分布扩展到包括正态分布、二项分布、泊松分布等在内的指数分散族模型(Nelder et al, 1972)。自 20 世纪 80 年代初, Coe 等(1982)和 Stern 等(1984)将经典的马尔科夫链降水模型归纳到广义线性模型以来,降水模型对于非稳态的降水问题的处理更为灵活,在计算上也可直接应用经典的统计标准软件包。这类由马尔科夫链模型发展而来的降水模型常称为马尔科夫—广义线性模型(Markov-GLM),或简称为广义线性模型。广义线性模型主要包括降水概率估计和降水估计两方面。

在降水发生概率估计时,广义线性模型灵活简便。主要表现在:① 降水发生概率表达形式灵活。早期马尔科夫链中主要取决于该站一天或几天前的降水状态。例如, Gabriel 等(1962)首先在日降水模拟中使用一阶干湿两态马尔科夫概率模型,后来逐渐出现了对多态或多阶链的探索(Dastidar et al, 2010; Haan et al, 1976; Jimoh et al, 1996; 丁裕国等, 2009; 么枕生, 1966)。Coe 等(1982)认为模型参数少反而能更好地估计、更为简便地计算,通过测试认为一阶或二阶的链一般就可满足拟合要求,后续各类降水模拟中也以一阶和二阶居多。② 广义线性模型通过对“链”在不同时间和空间上的配置组合,能够更方便地处理时空非稳态降水。对于某一站而言,一年不同时期的降水转移概率可以用不同的链拟合;对不同站而言,也可以用不同阶数的链来拟合;对于不同地区不同时期而言,链的形式及参数的取值也不同,中国学者

对此做了诸多探索(廖要明等, 2004; 廖要明等, 2009; 张光辉, 2004; 陈明昌等, 1994)。^③ 广义线性模型范畴下, 降水发生概率的影响因素不再局限于降水本身。Logistic函数通常作为降水发生概率和影响因素的连接函数构建模型。其中, 降水影响因素不仅可以包括本站几天前的日降水, 还可以包括时间变量的函数、地形环境要素、大尺度气候变量、区域预测的格点资料等(Chandler et al, 2002; 刘永和等, 2010)。^④ 影响降水因素的相互关系可进行丰富的数学表达。Coe等(1982)曾给出了常数、分段函数、多项式、傅里叶级数4种降水发生概率的示例表达。

降水量通常利用降水分布廓线来估计。在降水分布廓线的拟合中, 指数分布、混合指数模型、对数正态分布、几何分布都曾有过研究尝试比较和应用, 但以利用Gamma分布估计降水的实例居多(Chandler et al, 2002; Coe et al, 1982; Kottogoda et al, 2003; Little et al, 2009; Richardson, 1981; Stern et al, 1984; Wilks, 1998; 刘永和等, 2010), 有研究已从理论上证明并用实测资料验证了Gamma分布在降水拟合中的适用性(丁裕国, 1994)。

广义线性模型方法能够非常灵活地表达大尺度天气要素与日降水之间的关系, 在解释历史气候记录上有着强大功能(Chandler et al, 2002), 并可在一定程度上反映热带气旋潜在的降水型, 可解决降水模拟中时空连续性问题。但该方法也存在明显不足, 一般局限于对日值或月值降水的模拟, 对瞬时降水或极值降水事件模拟比较困难。为满足对高精度降水序列需求, 点过程模型常被用于解决日值数据在时间上降尺度的问题。

3.2 点过程模型

点过程模型(Point Process Model), 也称点降水模型(Point Rainfall Model), 是一类在对降水过程进行理解和简单假设的基础上, 将日值降水数据利用泊松过程解聚成更高精度降水的模型。解聚(Disaggregation)是利用日降水统计值来推断更高精度降水统计值的过程; 其逆过程为聚合(Aggregation), 是用小时尺度等高精度降水统计值来估计日降水统计值的过程。1975年, Kavvas和Delleur认识到降水发生时降水单元呈现出一种群聚过程而发时间符合泊松过程(Onof et al, 2000), 之后, 利用泊

松过程模拟降水的研究逐步展开, 众多表达高精度降水的点过程模型得到发展。

基于泊松群聚过程的点过程模型, 主要包括Bartlett-Lewis和Neyman-Scott矩形脉冲模型2类(Onof et al, 2000)。Rodriguez-Iturbe等(1987)首先利用Colorado地区的数据对Bartlett-Lewis模型进行了详细验证, 并提出了Neyman-Scott矩形脉冲模型的基本形式。在Bartlett-Lewis矩形脉冲模型中, 一场降水事件的发生时间属于泊松过程、降水单元的发生时间属于另一泊松过程、降水事件的历时取为随机变量(Cowpertwait, 1994, 1995, 2004; Rodriguez-Iturbe et al, 1988)。在Neyman-Scott矩形脉冲模型中, 一场降水事件中降水单元的发生时间是服从独立同分布的随机数。两种模型中对于每个降水单元都随机设定一个降水率和降水历时, 某一时间的降水量是所有降水单元降水量的累积。在此后两类模型的研究中, 针对不同降水型的参数设定(Bo et al, 1994; Islam et al, 1990; Rodriguez-Iturbe et al, 1988), 以及极值降水的模拟作了大量探讨(Cowpertwait, 1998; Cowpertwait et al, 2007)。除了基于泊松群聚过程的点过程模型外, 2012年Ramesh等提出, 双重随机泊松过程(Double Stochastic Poisson Process)在对高精度(如次、小时)的降水模拟中也是较为灵活适用的(Ramesh et al, 2012)。但此类模型适合单站或小流域的高时间精度降水模拟, 而不宜在降水影响差异大的大尺度流域推广。

广义线性模型和点过程模型可相互结合。Wheater等(2005)认为点过程泊松模型结合高精度的雷达数据可以在空间上推广, 但是高精度的数据无论在记录长度还是空间分布上都非常有限, 因而, 尝试在空间独立性的假设下基于长期雨量计数据构建了广义线性模型, 并对得到的日数据进行时间上的解聚。Segond等(2006)利用广义线性模型模拟多站点日降水并结合泊松群聚模型模拟小时降水, 在英国Lee流域对20个站点12年的小时降水进行了20次试验, 统计后发现该方法对极值降水的模拟能力相对有限, 但各类标准统计指标符合较好。可见, 随着对大范围高精度降水需求的提高, 广义线性模型和点过程模型相互结合应用对降水模拟的发展将起着积极作用。

3.3 隐马尔科夫链模型

隐马尔科夫链模型(Hidden Markov Model, HMM)是一种含有隐含状态的马尔可夫过程,其隐含参数需要利用可观测参数的概率分布来推测表达。

HMM模型应用于降水模拟的优点在于可通过对导致降水的不同天气状况的估计来进行降水自相关和空间相关的估计,但HMM模型是时间平稳过程模型。在HMM模型基础上发展的非平稳的非齐次隐马尔科夫链模型(Non-homogeneous Hidden Markov Model, NHMM),其降水估计可表达时间上的非平稳过程。1994年, Hughes 和 Guttorp(1994a, 1994b)首先提出将NHMM应用于多站的降水模拟。他们认为,如果观测网足够密集,在确定天气状况下的站点降水是与空间相关的;所以模型假设存在着一个不可观测的天气状况相联系的大尺度大气环流场和小尺度连续降水,天气状况和降水过程都服从有条件的马尔科夫过程。利用NHMM模型对美国普吉特南部24个站点、澳大利亚西南部的30个降水站点进行了模拟(Hughes et al, 1994b, 1999)。理论上NHMM模型能够通过隐态来反映真实的物理机制,且将非平稳融入条件概率的构建过程中,但是在实际应用中仍存在许多问题,例如,该模型只适用于天气尺度系统而不适用于对流尺度系统驱动下的降水模拟,模型所依赖的马尔科夫假设在实际降水数据的收集并不能完全满足等(Hughes et al, 1999)。

3.4 非参数模型

在对时空降水模拟的随机模型中,非参数模型不依赖参数分布,能够更真实地反映历史状况、更客观灵活地反映自相关与影响因子之间的非线性关系,最具代表性的是Lall等(1996)和Rajagopalan等(1996, 1999)。他们利用非参数核密度分布估计方法,通过最邻近抽样方法对历史数据重采样,来模拟包括降水在内的日值天气要素。对美国西部的盐湖城地区30年降水数据的应用分析表明,该方法的效果与Richardson(1981)提出的多元自回归模型效果相当。尽管这类方法能够成功模拟一些时间序列,但由于受历史样本限制,模拟结果并不能反映长期气候变化对降水的影响(Rajagopalan et al, 1999)。

4 基于热带气旋路径的降水事件模拟

除直接对降水时空序列进行模拟的随机模型外,将随机模拟的热带气旋路径、强度为输入,以热带气旋事件为模拟单元的确定性模型,已逐渐成为风险评估中获取大量降水样本的另一种重要方法。

基于热带气旋路径的降水事件模拟主要采用统计学方法或者动力—统计相结合方法。由于热带气旋本身具有较为规则结构的暖心系统,从其降水场结构出发来解决降水的空间连续性问题更为合理。另外,由于国内外学者对降水空间结构的研究颇多,以天气预报或气候预测为目的而发展的各类数值模式、动力模式以及动力—统计模式可为随机模拟提供参考借鉴。以下主要介绍3类代表模型。

4.1 基于降水率径向分布估计的统计学模型

热带气旋各向平均降水率常呈现沿半径增大而先增后减形式,用多项式、指数等函数形式对热带气旋降水径向分布拟合是描述降水空间结构的重要方式。

飓风降水率及分布估计模型(Hurricane Rainfall Rate and Distribution Estimator, HuRRDE)就是一种采用多项式拟合热带气旋降水径向分布关系,并考虑降水扇区、飓风强度不同对降水率影响所构建的经验模型。自1997年美国联邦应急管理部(Federal Emergency Management Agency, FEMA)开发了适合于美国地震、洪水、飓风损失评估的软件系统(Hazards United States-Multi Hazard, HAZUS-MH)以来,HuRRDE随之得到开发并应用于飓风损失评估系统中(FEMA, 2011)。

HuRRDE的建模主要包括4个步骤(FEMA, 2011):①对不同强度热带气旋的降水率随半径变化进行统计分析,初步建立降水率与半径的函数关系。数据源为1987年发射升空的美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program)所获得的微波成像辐射计(Special Sensor Microwave/Imager)的降水数据产品。根据已有研究(Alliss et al, 1992, 1993; Rodgers et al, 1994),模型假设台风眼处降水为零且最大风速半径近似取常数,最大风速半径以内,降水急剧增加,采用线性拟合降水随半径的变化;最大风速半径以外,降水衰减随半径增加

变缓,则采用四阶多项式拟合。②从热带气旋强度对降水率影响方面对模型进行修正(Rodgers et al, 1994)。假设热带气旋中心气压每升高(降低)20 hPa、降水降低(升高)35%来构建强度修正因子,并假设实时强度变化引起的气压差与降水率呈线性关系来构建变压修正因子。例如,前后时刻中心气压下降 10 hPa,则当前时刻降水率需乘以 1.1 的变压修正因子。③从降水不对称性方面对模型进行修正。由于热带气旋的前移速度和方向会引起降水分布不同(Frank, 1977; Jones, 1987; Peng et al, 1999; Shapiro, 1983),根据 Rodgers 等(1994)的研究,针对快速和慢速移动热带气旋,分别对以前进方向为正方向的 8 个降水扇区赋予不同权重作为修正因子。④利用热带气旋外围气压与中心气压差的一次函数作为修正系数对模型进行改进,以连续变化修正因子来定量表征连续性的热带气旋强度对降水率的影响。

HuRRDE 模型输入简单、计算方便、降水分布较为合理。由随机路径模型和风场模型随机模拟符合统计规律的最大风速半径、外围气压与近中心最低气压差等热带气旋参数序列作为输入,即可得到空间精度较高且统计上合理的降水场序列。HAZUS-MH 系统中的 HuRRDE 模型以北大西洋飓风为例,构建模型并给出经验参数,但借鉴时需考虑模型形式及参数的区域差异性。

4.2 气候持续性降水模型

气候持续性模型(Rainfall Climate and Persistence Model, R-CLIPER)是美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)开发的热带气旋气候持续性模型,是检验美国国家地球物理立体动力学实验室(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, GFDL)各种热带气旋定量降水预报模型的标杆。R-CLIPER 模型先后以雨量计数据、卫星遥感数据为数据源构建,后众多学者对其进行了改进,派生出诸如 PHRaM 等降水模型。与 HuRRDE 相比,R-CLIPER 模型不仅包含了热带气旋降水率径向分布模型,而且构建了登陆热带气旋的陆上降水衰减模型,另外,在其后续的改进模型中,热带气旋降水率与其影响要素的关系研究更为深入。

2001-2003 年,R-CLIPER 模型逐步建立,主要

分为 2 个阶段(DeMaria et al, 2001; Marks et al, 2002):① DeMaria 和 Tuleya 等在 NOAA 与科罗拉多州立大学合作的大气研究所(Cooperative Institute for Research in the Atmosphere)的支持下,利用美国 1948-2000 年 125 场登陆的热带气旋(其中包含 46 场飓风)的雨量站数据,分别对距热带气旋中心 500 km 范围内以 10 km 为间距的环状内不同热带气旋强度下平均降水率、登陆后不同时刻不同热带气旋强度下的降水率进行统计建模,建立了 R-CLIPER 模型雏形。②基于热带测雨卫星(Tropical Rain Measurement Mission, TRMM)降水估计数据,特别是微波影像 TMI 数据,对热带气旋降水的气候学特征进行了统计,进一步细化了模型(Lonfat et al, 2004)。在模型实现过程中,基于 Lonfat 等研究得到的各向平均降水的径向分布特点,结合热带气旋强度,构建了热带气旋的瞬时“雨迹(Rainfall Footprint)”,进而得到累积降水场。模型主要考虑了热带气旋的强度、尺度、登陆时间对降水分布的影响,而未考虑特殊天气环境引起的风垂直切变等对降水场不对称性的影响(Tuleya et al, 2007)。

尽管 R-CLIPER 模型表达简捷且对热带气旋路径附近区域平均降水率具有较强的估计能力,但仍有一些明显的局限性:①较为粗略的参数化方案丧失了许多重要信息,例如模型仅给出 3 种不同热带气旋强度下的模型形式,仅间接考虑表征气旋尺度的主要参数最大风速半径 R_{\max} ,诸如径向风速廓线、表面粗糙度、热带气旋的移动速度等其他因素均被忽略。②模型受假设“飓风的降水场是各向对称的”的限制而具有潜在的局限性(Lonfat et al, 2007)。具体表现在降水率在近 R_{\max} 处峰值明显偏低,即模型会低估最大降水。例如,由 TRMM 数据统计得到的飓风 3~5 级最大降水率大约在 12 mm/h,而由雷达反射率得到的降水率一般高于此值 2.5~3 倍(Langousis et al, 2009b)。③降水廓线是基于 TMI 的降水产品,而这一产品被认为在降水低值区会偏强而降水高值区则会偏弱(Viltard et al, 2006)。

针对以上不足,学者们开展了考虑最大风速、海陆转换、环境风垂直切变、地形等对降水率及降水不对称影响的研究。2007 年,Tuleya 等(2007)为更好的评价业务模型的热带气旋降水预测能力,主

要从两方面对R-CLIPER模型进行改进:①将研究重点放在登陆后降水的变化,利用雨量计数据建立了登陆后降水量与半径、登陆时间的函数关系并获得模型参数;②考虑强度对热带气旋降水的具体影响,利用最大风速来更为细致地表征热带气旋的强度,利用TRMM数据建立了热带气旋降水量与半径、最大风速的关系并获得了模型参数。2006年,Lonfat等对R-CLIPER模型进行了环境风垂直切变及地形修正,建立了参数化飓风降水模型(Parametric Hurricane Rainfall Model, PHRaM)(Lonfat et al, 2006, 2007)。具体为:①利用一阶傅里叶分析来描述风的垂直切变引起的空间不对称性;②通过计算气旋环流中气块在时间步长内高度的变化来描述地形的影响。由此,将R-CLIPER与风垂直切变模型、地形影响模型融合,得到PHRaM模型。通过与雷达观测数据的对比,考虑地形和风切变的PHRaM所得到的降水场较R-CLIPER模拟结果有显著改进。另外,Matyas等从图形学角度研究热带气旋降水区的整体形状特征(Matyas, 2007, 2010),Hence等进一步通过TRMM卫星提取热带气旋的垂直降水结构(Hence et al, 2011, 2012),这对R-CLIPER的降水总量、降水范围及不对称性降水的估计具有重要借鉴意义。需要注意的是,以上改进模型在平均降水率、平均降水分布上都有较强估计能力,但是如果进一步应用于风险评估,还需提高模型对降水极值的估计能力。

另外,有研究建立了考虑局地地形条件的气候持续性降水模型,这类研究多见于针对局部地区的地形(Cheung et al, 2006, 2008; Lee et al, 2006)。例如,1993年,Chang等基于82场台风的22个台湾地面站点观测数据,将 $19^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ 的研究区划分为 $2^{\circ}\times 2^{\circ}$ 网格,针对每个网格,统计当台风路径点落到该网格时研究区各站异常降水的分布情况,进而对降水场序列进行基本统计或EOF分析。2006年,Lee等基于类似的网格统计方法,利用台湾地区371个自动气象站(包括雨量站、地面站和几个岛屿站点)1989-2002年62场热带气旋期间的1小时观测降水数据,建立了各站点和32个流域的气候降水图,并进一步构建了热带气旋气候学降水模型(Lee et al, 2006)。其中针对某站点(或流域)的气候图中,每个网格记录的是当台风路径通过该网

格时那一站点(或流域)降水的气候平均值。与Chang等前人研究相比,以站点、流域进行统计成图在实际应用中更具可操作性,而统计网格精度也更高(在 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格上统计,进一步插值到 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$ 网格),涉及的站点数目更多且增加了对流域总降水的统计。2008年,Cheung等进一步探讨了降水预测中气候性和持续性降水的比重问题,在Lee等研究基础上构建了热带气旋气候—持续降水预测模型(CLIPER)。通过对所有站点预测值和观测值的相关性研究发现,可能与对流时间尺度有关,持续时间取3小时时降水估计效果较好。该模型假设热带气旋降水气候特征长期不变的情况下,基于研究区大量历史观测数据统计分析,考虑了热带气旋位置及平均气候状况,但未考虑单个热带气旋由自身空间结构和强度等对降水产生的影响,因而对于平均降水估计较为理想,但不能很好地反映瞬时的极端降水。

4.3 基于边界层模型的降水物理统计模型

基于边界层模型的降水物理统计模型(Modified-Smith-for-Rainfall Model)是由美国麻省理工学院土木与环境工程系的Langousis和Veneziano等针对长期风险评估而共同开发的,是一种基于热带气旋边界层的出流水汽量来估算降水的物理—统计模型(Langousis et al, 2009b)。

该模型主要分为4步:①利用Langousis等得到的边界层模型(Langousis et al, 2009a),根据水平径向风速、切向风速计算垂直风速;②假设上升水汽量与降水量是成正比的,利用垂直风速、单位饱和空气柱中水汽量(其中饱和空气柱中的水汽量可由空气温度转化而来),计算水汽垂直通量,进而计算在热带气旋呈理想对称分布下的降水率;③假设上升气流与地面的夹角随着与气旋中心的距离增加呈指数递减,以此通过修正云墙的倾角而修正热带气旋的降水量;④分析热带气旋内部动量和垂直切变的不对称性,并在模型中加入动量的不对称对降水进行修正(Langousis et al, 2009b)。该模型主要利用基于热力学和用于计算边界层热带气旋垂直风速的简单数值模型取得水汽垂直通量和地表降水率,热带气旋的特征主要通过梯度风切向风速的径向廓线、热带气旋的移动速度、地表拖拽系数、边界层的平均温度和饱和率来描述。由于简单

或复杂的热带气旋模型都不可能降水参数进行准确的统计估算,因此任何确定性降水模型都必须利用降水残差的统计表征来进行弥补(Langousis et al, 2009c)。

从尺度上讲,该模型能够对整场热带气旋降水事件及其不对称雨带进行模拟,但对于阵雨和局地对流造成的降水波动未加以考虑。在Langousis后续的研究中,基于TRMM数据对相关参数的计算,应用MSR模型对墨西哥湾沿岸热带气旋降水风险进行了评估(Langousis et al, 2009b)。

5 结论与展望

5.1 结论

热带气旋灾害风险评估研究中的降水极值模拟、降水时空随机模拟和降水事件模拟各具特点:

基于极值理论的降水极值模拟方法,其理论较为成熟、计算简便、可充分利用稀有极值样本得到较为符合历史统计规律的结果,并可校验降水时空模拟结果。但该方法常受数据时空精度的限制,适用范围有限,针对热带气旋路径随机性较大且带来的降水空间分布、降水量及降水极值具有较大的不确定性,该方法不能较好地定量表达。

基于站点的降水时空模拟方法,能够基于历史样本模拟仿真不同尺度的降水时间序列,并以样本本身或背景条件所反映的空间关系一定程度上解决降水空间连续性问题,但目前仍不能很好地反映热带气旋降水的空间分布以及由路径随机性带来的降水空间的不确定性。

基于热带气旋事件路径的降水模拟方法,可以较好反映热带气旋空间结构,借助于热带气旋模拟路径,可构建空间分布较为真实的热带气旋降水,但其对大量事件的模拟需依赖于路径模拟结果。

5.2 展望

目前,在极值降水模拟、基于站点的降水时空随机模拟、基于路径的热带气旋事件降水模拟等领域,已经取得了长足的进展,今后可在以下方面考虑予以进一步改进。

(1) 加强极值理论在热带气旋降水中应用,将极值降水模拟作为长期风险研究的必要补充。极值降水的模拟不乏与热带气旋风险评估结合研究的

实例,从一定程度上反映了极值理论在热带气旋灾害研究中的优势。但该方法对于数据依赖性大,对观测数据的样本长度、时间精度要求高,特别对降水而言,受局地地形影响大,其结果的空间展示较为困难。

(2) 充分借鉴已应用于洪水风险评估领域的研究方法,发挥基于站点的时空降水随机模型对时间序列模拟的优势。目前,极端洪水事件的风险需要在连续降雨径流模型运行较长时间后进行评估,因而考虑比较精细的时间分辨率(如小时)并结合空间变化的长期雨量数据记录,发展了一系列时空降水随机模型,并产生符合自然规律的随机降水数据。这些模型通常在时间上是非平稳的,以便考虑气候变化、季节性和低频气候变异等因素。如前文所述,广义线性模型、点过程模型等,都得到了较好的发展和应用,因而,要充分借鉴其对时间序列的模拟方法。

(3) 改进基于站点的降水随机模拟中的空间连续性问题。诸如广义线性模型、非齐次隐马尔科夫模型尽管可通过在大尺度要素等影响下的降水概率间接地反映降水型,但对于针对热带随机路径产生的降水空间分布仍难以灵活表达。因而应加强考虑路径的随机性对空间降水型的影响,例如,可以设定热带气旋发生的判别条件,并将一定空间范围内的热带气旋点的出现概率合理嵌入到以上模型中。另外,广义线性模型和点过程模型的结合可以进一步提高模拟的时空精度,从热带气旋降水特点出发,使点过程对于降水空间相关的数学表达更为合理。

(4) 充分考虑热带气旋自身的降水结构,发挥热带气旋事件模型的优势。以热带气旋事件为单元的降水模拟,能较清晰地反映降水的空间结构,通过进一步结合随机路径而产生大量降水事件,可以为风险研究提供较为理想的降水样本。但在对降水结构的探索上仍存在许多问题需要探讨,诸如环境垂直切变和地形等如何影响不对称降水。另外,应加强热带气旋与其他系统相互作用引发降水的模拟,也需充分考虑除热带气旋暴雨灾害中降水与环境要素相结合所造成的灾害的放大作用(Hellin, et al, 1999),这些实际可能发生的降水组合和要素组合对风险研究将更有意义。

参考文献(References)

- Alliss R J, Raman S. 1992. Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) observations of hurricane Hugo(1989). *Monthly Weather Review*, 120(12): 2723-2737.
- Alliss R J, Sandlin G D, Chang S W, et al. 1993. Applications of SSM/I data in the analysis of hurricane Florence (1988). *Journal of Applied Meteorology*, 32(10): 1581-1591.
- Bo Z, Islam S. 1994. Aggregation-disaggregation properties of a stochastic rainfall model. *Water Resources Research*, 30(12): 3423-3435.
- Chandler R E, Wheaton H S. 2002. Analysis of rainfall variability using generalized linear models: A case study from the west of Ireland. *Water Resources Research*, 38(10): 1192-1202.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q. 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27(5): 967-976.
- Chen M C, Zhang Q, Yang J L, et al. 1994. Stochastic simulation model and its verification of precipitation, temperature and sunshining hours. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 12(2): 17-26. [陈明昌, 张强, 杨晋玲, 等. 1994. 降水、温度和日照时数的随机生成模型和验证. *干旱地区农业研究*, 12(2): 17-26.]
- Chen Z H, Tang H T. 2008. Distribution models of extreme typhoon winds based on numerical simulation of wind data. *Journal of Chongqing University*, 31(11): 1285-1289. [陈朝晖, 汤海涛. 2008. 台风极值风速的数值模拟及分布模型. *重庆大学学报*, 31(11): 1285-1289.]
- Cheung K K W, Huang L, Lee C. 2008. Characteristics of rainfall during tropical cyclone periods in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(6): 1463-1474.
- Cheung K, Huang L, Lee C. 2006. A tropical cyclone rainfall climatology-persistence model for the Taiwan area. *Proceedings of the 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Monterey, California: 24-28 April.
- Chou J F. Predictability of weather and climate. 2011. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 1(2): 11-14. [丑纪范. 2011. 天气和气候的可预报性. *气象科技进展*, 1(2): 11-14.]
- Coe R, Stern R D. 1982. Fitting models to daily rainfall data. *Journal of Applied Meteorology*, 21(7): 1024-1031.
- Coles S, Pericchi L R, Sisson S. 2003. A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling. *Journal of Hydrology*, 273(1-4): 35-50.
- Cowpertwait P S P. 1994. A generalized point process model for rainfall. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 447: 23-37.
- Cowpertwait P S P. 1995. A generalized spatial-temporal model of rainfall based on a clustered point process. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 450: 163-175.
- Cowpertwait P S P. 1998. A Poisson-cluster model of rainfall: High-order moments and extreme values. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454: 885-898.
- Dastidar A G, Ghosh D, Dasgupta S, et al. 2010. Higher order Markov chain models for monsoon rainfall over West Bengal, India. *India Journal of Radio & Space Physics*, 39(1): 39-44.
- DeMaria M, Tuleya R E. 2001. Evaluation of quantitative precipitation forecasts from the GFDL hurricane model. *Precipitation Extremes: Prediction, Impacts, and Responses*. Albuquerque, New Mexico: 14-18 January.
- Ding Y G, Zhang J L, Jiang Z H. 2009. The simulation experiments of extreme rainfall based on a multi-status Markov chain model over east region of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(1): 20-27. [丁裕国, 张金铃, 江志红. 2009. 基于多状态 Markov 链模式的极端降水模拟试验. *气象学报*, 67(1): 20-27.]
- Ding Y G. 1994. Research of universality for Γ distribution model of precipitation. *Scientia Atmospherica Sinica*, 18(5): 552-560. [丁裕国. 1994. 降水量 Γ 分布模式的普适性研究. *大气科学*, 18(5): 552-560.]
- Fan L J, Fu C B, Chen D L. 2005. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. *Advance in Earth Sciences*, 20(3): 320-329. [范丽军, 符滨斌, 陈德亮. 2005. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 20(3): 320-329.]
- FEMA. 2011. Hazus-MH MR5 technical manual for the hurricane model. Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, Mitigation Division.
- Fisher R A, Tippett L H C. 1928. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 24(2): 180-190.
- Frank W M. 1977. The structure and energetics of the tropical cyclone I. Storm structure. *Monthly Weather Review*, 105(9): 1119-1135.
- Gabriel K R, Neumann J. 1962. A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of*

- the Royal Meteorological Society, 88: 90-95.
- Haan C T, Allen D M, Street J O. 1976. A Markov chain model of daily rainfall. *Water Resources Research*, 12(3): 443-449.
- Hellin J, Haigh M, Marks F. 1999. Rainfall characteristics of Hurricane Mitch. *Nature*, 399: 316.
- Hence D A, Houze R A. 2011. Vertical structure of hurricane eyewalls as seen by the TRMM precipitation radar. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(8): 1637-1652.
- Hence D A, Houze R A. 2012. Vertical structure of tropical cyclones with concentric eyewalls as seen by the TRMM precipitation radar. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(3): 1021-1036.
- Hughes J P, Guttorp P, Charles S P. 1999. A non-homogeneous hidden Markov model for precipitation occurrence. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 48(1): 15-30.
- Hughes J P, Guttorp P. 1994a. A class of stochastic models for relating synoptic atmospheric patterns to regional hydrologic phenomena. *Water Resources Research*, 30(5): 1535-1546.
- Hughes J P, Guttorp P. 1994b. Incorporating spatial dependence and atmospheric data in a model of precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 33(12): 1503-1515.
- Islam S, Entekhabi D, Bras R L, et al. 1990. Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall. *Journal of Geophysical Research*, 95(D3): 2093-2100.
- Jimoh O D, Webster P. 1996. The optimum order of a Markov chain model for daily rainfall in Nigeria. *Journal of Hydrology*, 185(1-4): 45-69.
- Jones R W. 1987. A simulation of hurricane landfall with a numerical model featuring latent heating by the resolvable scales. *Monthly Weather Review*, 115(10): 2279-2297.
- Kottogoda N T, Natale L, Raiteri E. 2003. A parsimonious approach to stochastic multisite modelling and disaggregation of daily rainfall. *Journal of Hydrology*, 274(1-4): 47-61.
- Lall U, Rajagopalan B, Tarboton D G. 1996. A nonparametric wet/dry spell model for resampling daily precipitation. *Water Resources Research*, 32(9): 2803-2823.
- Langousis A, Veneziano D, Chen S. 2009a. Boundary layer model for moving tropical cyclones//Elsner J B, Jagger T H. *Hurricanes and Climate Change*. New York: Springer: 265-286.
- Langousis A, Veneziano D. 2009b. Long-term rainfall risk from tropical cyclones in coastal areas. *Water Resources Research*, 45(11): W11430.
- Langousis A, Veneziano D. 2009c. Theoretical model of rainfall in tropical cyclones for the assessment of long-term risk. *Journal of Geophysical Research*, 114: D02106.
- Lee C S, Huang L R, Shen H S, et al. 2006. A climatology model for forecasting typhoon rainfall in Taiwan. *Natural Hazards*, 37(1-2): 87-105.
- Liao Y M, Chen D L, Gao G, et al. 2009. Impacts of climate changes on parameters of a weather generator for daily precipitation in China. *Acta Geographica Sinica*, 64(7): 871-878. [廖要明, 陈德亮, 高歌, 等. 2009. 中国天气发生器降水模拟参数的气候变化特征. *地理学报*, 64(7): 871-878.]
- Liao Y M, Zhang Q, Chen D L. 2004. Precipitation simulation in china with a weather generator. *Acta Geographica Sinica*, 59(5): 689-698. [廖要明, 张强, 陈德亮. 2004. 中国天气发生器的降水模拟. *地理学报*, 59(5): 689-698.]
- Little M A, Mcsharry P E, Taylor J W. 2009. Generalized linear models for site-specific density forecasting of U.K. Daily rainfall. *Monthly Weather Review*, 137(3): 1029-1045.
- Liu Y H, Zhang W C, Zhu S L, et al. 2010. A stochastic precipitation generator based on generalized linear models and NCEP reanalysis data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 34(3): 599-610. [刘永和, 张万昌, 朱时良, 等. 2010. 基于广义线性模型和NCEP资料的降水随机发生器. *大气科学*, 34(3): 599-610.]
- Lonfat M, Marks Jr. F M, Chen S S. 2004. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission(TRMM) microwave imager: A global perspective. *Monthly Weather Review*, 132(7): 1645-1660.
- Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al. 2007. A parametric model for predicting hurricane rainfall. *Monthly Weather Review*, 135(9): 3086-3097.
- Lonfat M, Rogers R, Marks Jr. F D, et al. 2006. The effect of shear and topography on rainfall forecasting with R-CLIPER. *Proceedings of the 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. Monterey, California: 24-28 April.
- Marks F, Kappler G, DeMaria M. 2002. Development of a tropical cyclone rainfall climatology and persistence (R-CLIPER) model. *Reprints of the 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology*. San Diego, California: 29 April-3 May.
- Matyas C J. 2010. Associations between the size of hurricane rain fields at landfall and their surrounding environments.

- Meteorology and Atmospheric Physics, 106(3-4): 135-148.
- Matyas C. 2007. Quantifying the shapes of U.S. landfalling tropical cyclone rain shields. *The Professional Geographer*, 59(2): 158-172.
- McNeil A J. 1999. Extreme value theory for risk managers// British Bankers' Association. Internal modeling and cad II: Qualifying and quantifying risk within a financial institution. London: Risk Books: 93-113.
- Nelder J A, Wedderburn R W M. 1972. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: General*, 135(3): 370-384.
- Onof C, Chandler R E, Kakou A, et al. 2000. Rainfall modeling using Poisson-cluster processes: A review of developments. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 14(6): 384-411.
- Peng M S, Jeng B-F, Williams R T. 1999. A numerical study on tropical cyclone intensification. Part I: Beta effect and mean flow effect. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(10): 1404-1423.
- Rajagopalan B, Lall U, Tarboton D G. 1996. Nonhomogeneous Markov model for daily precipitation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 1(1): 33-40.
- Rajagopalan B, Lall U. 1999. A K-Nearest-Neighbor simulator for daily precipitation and other weather variables. *Water Resources Research*, 35(10): 3809-3101.
- Ramesh N I, Onof C, Xie D. 2012. Doubly stochastic Poisson process models for precipitation at fine time-scales. *Advances in Water Resources*, 45: 58-64.
- Rappaport E N. 2000. Loss of life in the United States associated with recent Atlantic tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9): 2065-2073.
- Richardson C W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*, 17(1): 182-190.
- Rodgers E B, Chang S W, Pierce H F. 1994. A satellite observational and numerical study of precipitation characteristics in Western North Atlantic tropical cyclones. *Journal of Applied Meteorology*, 33(2): 129-139.
- Rodriguez-Iturbe I, Cox D R, Isham V. 1988. A point process model for rainfall: Further developments. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 417: 283-298.
- Rodriguez-Iturbe I, Cox D R, Isham V. 1987. Some models for rainfall based on stochastic point processes. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 410: 269-288.
- Second M, Onof C, Wheeler H. 2006. Spatial-temporal disaggregation of daily rainfall from a generalized linear model. *Journal of Hydrology*, 331(3-4): 674- 689.
- Shapiro L. 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(8): 1984-1998.
- Shi X W, Fang W H, Lin W, et al. 2011. Uncertainty of china typhoon rainfall probability estimation with different extreme-value models. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 47(5): 493-501. [石先武, 方伟华, 林伟, 等. 2011. 基于极值理论的中国台风降水不确定性分析. 北京师范大学学报: 自然科学版, 47(5): 493-501.]
- Stern R D, Coe R. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of the Royal Statistical Society Series A: General*, 147(1): 1-34.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change//IPCC. Climate change 2007: The physical science basis(Contribution of working group I to the fourth assessment report). Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
- Tuleya R E, Demara M, Kuligowski R J. 2007. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for U.S. landfalling tropical storms. *Weather and Forecasting*, 22(1): 56-70.
- Viltard N, Burlaud C. 2006. Rain retrieval from TMI brightness temperature measurements using a TRMM PR-based database. *Journal of Applied Meteorology*, 45(3): 455-466.
- Wen K G, Ding Y H. 2008. Chinese meteorological disasters pandect. Beijing, China: China Meteorological Press. [温克刚, 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典(综合卷). 北京: 气象出版社.]
- Wheeler H S, Chandler R E, Onof C J, et al. 2005. Spatial-temporal rainfall modelling for flood risk estimation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(6): 403-416.
- Wilks D S. 1998. Multisite generalization of a daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*, 210(1-4): 178-191.
- World Bank. 2010. Natural hazards, unnatural disasters: The economics of effective prevention.
- Wu Z K, Zhao L, Ge Y J. 2010. Statistical analysis of wind velocity and rainfall intensity joint probability distribution of Shanghai area in typhoon condition. *Acta Aerodynamica Sinica*, 28(4): 393-399. [武占科, 赵林, 葛耀君. 2010. 上海地区台风条件风速和雨强联合概率分布统计. 空

气动力学报, 28(4): 393-399.]

Yao Z S. 1966. Probability of wet and dry day in stochastic process. *Acta Meteorologica Sinica*, 36(2): 249-260. [么枕生. 1966. 湿日与干日随机变化的概率. *气象学报*, 36(2): 249-260.]

Zhang G H. 2004. Adaptability of climate generator of CLIGEN in Yellow River Basin. *Journal of Soil Water Conservation*, 18(1): 175-179. [张光辉. 2004. CLIGEN天气发生器在黄河流域的适应性研究. *水土保持学报*, 18(1): 175-179.]

Review on modeling of tropical cyclone rainfall

LI Ying^{1,2}, FANG Weihua^{1,2,3}

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

Abstract: China is one of the countries severely suffering from tropical cyclone (TC) disaster. Accurate rainfall modeling is of great significance for TC disaster risk assessment. From the perspective of TC disaster risk assessment, the methods of rainfall modeling can be classified into three categories, such as extreme rainfall modeling based on extreme value theory, stochastic space-time rainfall modeling based on ground station data, and TC rainfall event modeling based on stochastic TC tracks. This paper analyzes the demand of rainfall modeling for TC disaster risk assessment, and then reviews the principles, procedures, improvements and features of the three types of models. It is concluded that TC rainfall modeling for disaster risk assessment needs to integrate both the common features in rainfall modeling and the special requirements for TC rainfall simulation, in order to achieve a good balance among accuracy of TC rainfall, reliability of statistical results and computational costs. TC rainfall modeling should be based upon extreme value theory for long-term catastrophe risk analysis, and stochastic models are ideal for site-specific rainfall time series simulation, while stochastic TC rainfall event simulation, as the most advanced method, still needs further study in the areas such as rainfall mechanism and spatial structure, etc.

Key words: tropical cyclone; rainfall modeling; disaster; risk assessment