

张文, 赵珊珊, 万仕全, 等. 2018. 基于人工智能技术的热带气旋灾害评估方法研究: 以广东省为例 [J]. 气候与环境研究, 23 (4): 504-512. Zhang Wen, Zhao Shanshan, Wan Shiquan, et al. 2018. A study on evaluation method of tropical cyclone disaster assessment based on artificial intelligence technology: Taking Guangdong Province as an example [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (4): 504-512, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18001.

基于人工智能技术的热带气旋灾害评估方法研究: 以广东省为例

张文¹ 赵珊珊^{2,3} 万仕全⁴ 封国林²

1 南京邮电大学通达学院, 江苏扬州 225127

2 国家气候中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

4 扬州市气象局, 江苏扬州 225009

摘要 基于历史观测资料, 系统地研究了广东省热带气旋 (tropical cyclone, TC) 风雨及其带来的直接经济损失的空间分布特征。结果表明, 粤西沿海地区受 TC 大风影响最为频繁, 但 TC 经济灾损率和受灾频次在粤西和粤东较重。根据广东省 TC 风雨和直接经济损失的空间分布特征, 将广东分为粤西、粤东、珠三角和粤北 4 个区域, 进而利用演化建模方法建立了广东省各区域 TC 经济灾损率评估模型。该评估模型模拟的 TC 经济灾损率与实际值的相关系数达 0.66 以上, 基于该模型对独立样本的预测检验结果与实际值的相关系数达到 0.61 以上 (显著性水平 $\alpha=0.05$)。这表明, 基于演化建模方法建立的广东省各区域评估模型在广东省 TC 灾害评估中有着潜在的应用价值。

关键词 热带气旋灾害评估 县域单元 经济灾损率 人口受灾率 演化建模

文章编号 1006-9585 (2018) 04-0504-09

中图分类号 P49

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18001

A Study on Evaluation Method of Tropical Cyclone Disaster Assessment Based on Artificial Intelligence Technology: Taking Guangdong Province as an Example

ZHANG Wen¹, ZHAO Shanshan^{2,3}, WAN Shiquan⁴, and FENG Guolin²

1 TongDa College, Nanjing University of Post and Telecommunications, Yangzhou, Jiangsu Province 225127

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 Yangzhou Meteorological Office, Yangzhou, Jiangsu Province 225009

Abstract The spatial distribution characteristics of tropical cyclone (TC) rainfall and direct economic losses incurred by TCs in Guangdong Province are systematically studied based on historical observation data. The results show that the coastal areas of western Guangdong are most frequently affected by TC winds, whereas the economic loss rates and disaster frequencies are much larger in the southwestern and eastern seashore areas of Guangdong. According to the

收稿日期 2018-01-02; 网络预出版日期 2018-05-22

作者简介 张文, 女, 1982 年出生, 硕士, 讲师, 从事非线性气候动力学研究。E-mail: zhangwen@njupt.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金 41475064、41605069、41475073

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41475064, 41605069, and 41475073)

spatial distribution characteristics of TC precipitation, high winds and rate of economic loss, Guangdong Province is divided into four regions. The evolutionary modeling method is then used to build the assessment model of TC economic loss rate in each region. The correlation coefficient between the simulated TC economic loss rate and the actual value is larger than 0.66, and the correlation coefficient between the pre-evaluation results and the actual values of independent samples reaches above 0.61 (significant at the level of $\alpha=0.05$). This result shows that the regional assessment model based on the evolutionary modeling method has potential application value in the assessment of TC disaster in Guangdong Province.

Keywords Tropical cyclones disaster assessment, County unit, Economic loss rate, Affected people rate, Evolutionary modeling

1 引言

我国是世界上遭受热带气旋 (tropical cyclone, TC) 影响最严重的国家之一。平均每年有 16.8 个 TC 给我国带来降水、大风等影响(王小玲等, 2006), 其中有 8 个为未登陆 TC(王小玲和任福民, 2008), 因此未登陆的 TC 也可能对我国造成较大的灾害损失(赵珊珊等, 2015)。近 60 年来, 我国周边海域 ($0^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $95^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$) TC 频数和平均强度呈现弱的下降趋势, 但近 10 年来, 台风(中心附近最大风力 12 级)及以上级别 TC 频数和强度极值明显增加(李倩等, 2013)。台风及以上级别的 TC 强度和频数的增加导致近年来(2004~2013 年)我国平均每年 TC 造成的直接经济损失比上个 10 年(1994~2003 年)的平均值增加了 12%(赵珊珊等, 2015)。因此, 客观量化的评估 TC 灾害损失, 对于我国 TC 灾害风险管理具有重要意义。

国内外针对 TC 灾害损失评估方法的研究已经开展了较多的工作(Watson and Johnson, 2004)。这些研究工作总体上可分为 3 类: 一类是基于数值模式, 如 Vickery et al. (2006) 建立的美国多灾种飓风风险模型(Hazards U.S. Multi-Hazard); 第二类是基于统计方法, 如相关分析方法(林继生和罗金铃, 1995)、层次分析法(李春梅等, 2006; 李艳兰等, 2008)、逐步回归方法(钱燕珍等, 2001; 何彩芬和钱燕珍, 2002; 陈佩燕等, 2009)等, 通过研究 TC 灾害损失和台风降水、大风的关系建立评估模型; 第三类是基于非线性方法建立评估模型, 如灰色关联方法(张颖超和仲丽君, 2013)、模糊数学方法(樊琦和梁必骐, 2000; 马清云等, 2008)、BP(Back Propagation, 反向传播)神经网络模型(娄伟平等, 2009)、向量机模型(Zhang and Lou, 2010)等。TC 造成的灾害损失不仅与 TC 本身强度有关,

还受到承灾体暴露度、脆弱性等因素影响, 是一个非线性复杂系统行为的结果。因此, 利用线性建模方法评估 TC 灾害损失具有一定的局限性(丁瑞强和李建平, 2008; Ding et al., 2017)。近年来发展的适用于复杂系统分析的演化建模方法能够很好地适应于非线性时间序列的建模。该方法是模拟自然界的生物演化过程, 借鉴生物界的自然选择和自然遗传机制而发展起来的一类求解问题的策略和方法。由于演化建模方法具有自组织、自适应和自学习等特征, 目前已被成功应用于机器学习、模式识别、经济预测等领域(俞康庆等, 2005; 何文平等, 2012; Lou et al., 2012; Wan et al., 2012; Wang et al., 2015; He et al., 2016)。

总体来看, 在我国 TC 灾害损失评估模型的研究中, 其评估结果大多是全国或者某个省(区、市)的总损失, 而对于空间上更为精细化的 TC 灾害损失评估的工作开展较少(郁亚娟等, 2007)。我国各省(区、市)中, 广东受到 TC 影响最频繁, 时间最长, 灾害损失也最严重(任福民等, 2008; 赵珊珊等, 2015; 朱婧等, 2017)。1949~2006 年, 平均每年登陆广东 TC 有 3.76 个, 其中大部分登陆粤西(湛江、阳江、茂名)西部, 而在粤东(汕头、汕尾、潮州、揭阳)中区登陆较少(胡娅敏等, 2008, 2011)。可见, 广东各地区受 TC 影响程度存在较大差异。因此, 本文拟利用广东省县域单元的 TC 灾情资料, 研究精细化的广东省 TC 灾害损失的特征分布, 并利用演化建模方法建立县域单元的 TC 灾害损失评估模型, 从而为台风灾害风险管理工作提供科学依据。

2 资料和方法

2.1 资料

影响中国的 TC 信息来自《热带气旋年鉴》(中

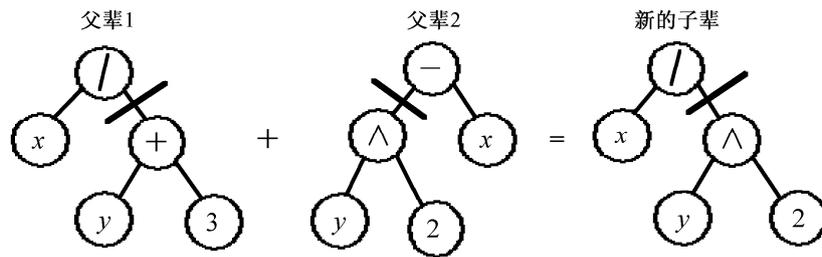


图1 演化算法中的杂交操作示意图(两个父辈通过杂交生成一个新的子辈)

Fig. 1 Schematic diagram of the crossover operation for binary trees [a new offspring (new binary tree) can be produced by the operation of crossover between two parents (cold binary tree)]

国气象局, 2005~2015), 包括 TC 路径、近中心最低气压和近中心最大风速等资料。气象台站观测资料来自中国气象局国家信息中心, 包括了 2004~2014 年广东省 85 个气象台站观测的日降水量和日最大风速。利用任福民等(2001)、Ren et al. (2007)、陆逸等(2016)提出的改进的客观天气图分析技术方法, 将 TC 影响期间 TC 影响范围内的气象台站及其观测到的大风和降水挑选出来。定义大风日数为日最大风速在 6 级 (10.8 m/s) 及以上的天数。

2004~2014 年广东省县域(县、区、市) TC 灾情资料来自中国气象局县级灾情普查数据库, 包括了广东省 122 个县域行政单元的 417 条灾情记录。每条灾情记录内容包含了受灾地区、时间、台风编号、直接经济损失等信息。本文还采用了《中国县域统计年鉴(县市卷)》(国家统计局农村社会经济调查司, 2004~2014)中广东省各县域的历年国民生产总值(Gross Domestic Product, GDP)资料。

2.2 方法

演化算法主要是用遗传程序设计优化模型结构, 以遗传算法优化模型参数, 根据观测数据建立常微分方程。在演化算法中, 通常一个偏微分方程或者常微分方程可以采用一个二叉树的形式来进行表征(图 1)。演化建模的算法简述如下(何文平等, 2012; 王柳等, 2014):

- (1) 输入原始观测数据, 并对其进行预处理;
- (2) 设置模型参数, 包括初等函数集(包括加、减、乘、除、三角函数、指数函数、对数函数、幂函数等), 建模样本数, 微分方程的阶数, 初始种群规模, 种群演化的代数, 二叉树的最大树深, 种群之间的遗传、变异的概率, 演化建模的停机条件;
- (3) 随机初始化微分方程的种群;
- (4) 对初始化种群进行演化操作(遗传、变异, 见图 1, <http://www.obitko.com/tutorials/genetic->

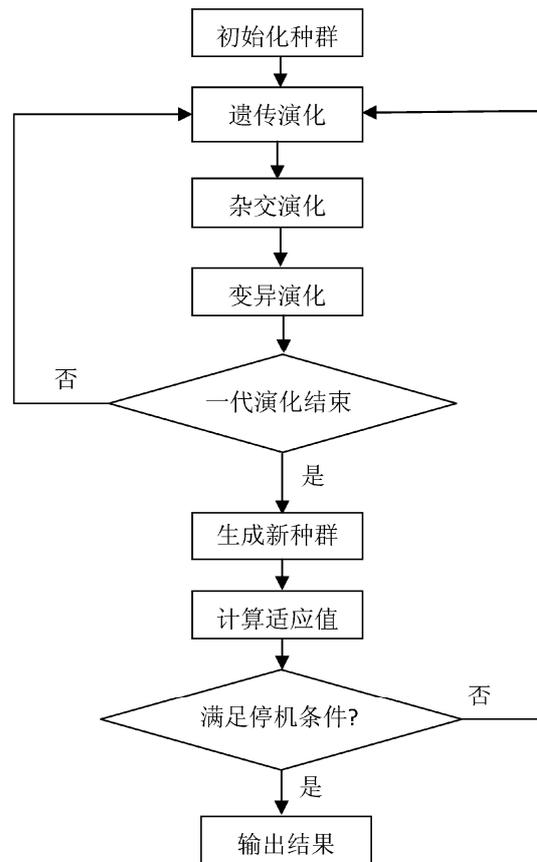


图2 演化建模的流程

Fig. 2 Flowchart of evolutionary modeling

algorithms/crossover-mutation.php, [2018-6-29]);

- (5) 计算种群的适应值;
- (6) 对种群进行最优挑选, 保存至种子库;
- (7) 从种子库导入种子进行演化操作;
- (8) 重复第 5 步, 直至达到第 2 步中所设置的停机条件为止;
- (9) 将适应值较优的动力学方程作为演化建模的预测方程。

演化算法的流程图由图 2 给出, 本文中适应值采用由演化算法所获取的方程的回报结果与用于

建模的样本之间的方差, 方差越小表明回报效果越好。

社会财富的不断累积使得相同的致灾因子强度对同一地区在不同时期造成的灾害损失可能不同 (Pielke and Landsea, 1998; Pielke et al., 2008)。为了一定程度上减轻社会经济发展的影响, 定义了县域单元的 TC 过程经济灾损率:

$$E = m_0 / m_{GDP} \times 100\%, \quad (1)$$

其中, m_0 为 TC 过程造成的某一县域单元的直接经济损失, m_{GDP} 为当年该县域单元 GDP。该方法常用于不同年份直接经济损失的比较 (陈佩燕等, 2009)。

类似地, 定义了 TC 过程人口受灾率:

$$H = P_0 / P \times 100\%, \quad (2)$$

其中, P_0 为 TC 过程造成的某一县域单元的受灾人口, P 为当年该县域单元常住人口数量。

3 结果与分析

3.1 TC 风雨的分布特征

2004~2013 年, 广东省平均每年 TC 造成的降水量空间分布不均匀, 沿海地区降水量一般有 300~500 mm, 其中江门、中山、汕尾、揭阳等地降水量超过 500 mm, 而北部韶关、肇庆的部分地区降水量不足 200 mm (图 3a)。平均每年广东省 TC 降水年频次一般有 4~6 次, 其中江门、中山、揭阳等地达 6 次以上, 而东北部的韶关不足 4 次 (图 3b)。平均每次的 TC 过程降水量也在沿海地区较大, 一般有 70~90 mm, 揭阳局地在 90 mm 以上, 而韶关、肇庆的部分地区不足 50 mm (图 3c)。

2004~2013 年, 广东 TC 大风主要分布在沿海和珠三角 (东莞、佛山、广州、江门、深圳、中山、珠海、惠州) 地区, 其中湛江、茂名、阳江、江门、佛山、深圳等地平均每年均出现大风日数, 而韶关、清远、河源、梅州等地年平均大风日数不足 0.2 d (图 3d)。从多年平均的 TC 大风过程年频次来看, 粤西沿海地区是受 TC 大风影响最频繁的地区, 平均每年遭遇 1 次以上的 TC 大风过程, 其中阳江地区 TC 大风过程年频次 ($3.5 a^{-1}$) 为全省最多, 湛江 ($2.2 a^{-1}$) 为次多 (图 3e)。珠三角地区的 TC 大风过程年频次也较大, 其中珠三角西部地区一般在 $1 a^{-1}$ 以上。粤东和粤北的 TC 大风过程年频次相对较小, 除了粤东沿海地区外的大部分地区年频次为 $0.1 \sim 0.5 a^{-1}$, 即大约每 2~10 a 遭遇一次 TC 大风过

程。平均每次 TC 过程的大风日数主要出现在粤西和粤东, 尤其是汕尾、揭阳、河源南部等地平均过程大风日数在 1.5 d 以上 (图 3f)。这表明, 虽然粤东沿海地区 TC 大风过程次数较粤西和珠三角偏少, 但平均每次的 TC 造成的大风持续时间较长。

3.2 广东省 TC 经济灾损率的分布特征

2004~2013 年, 广东省县域 TC 经济灾损率的平均值为 1.6%, 人口受灾率平均值为 12.6%。其中 0606 号“派比安”造成韶关乳源瑶族自治县的经济灾损率最大, 为 33.7%; 0814 号强台风“黑格比”造成茂名高州市的人口受灾率最大, 为 92.6%。可见, 不同 TC 过程造成的经济灾损率和人口受灾率差异较大。根据 2004~2013 年广东省每次 TC 过程造成的县域单元经济灾损率和人口受灾率的样本数分布, 按照样本数 10%、30%、60%和 90%分类, 可以将经济灾损率和人口受灾率划分为 5 个等级 (见表 1)。

表 1 广东省热带气旋 (Tropical cyclone, TC) 经济灾损率和人口受灾率等级

Table 1 Grades of economic loss rate and population rate affected by Tropical cyclone (TC)-induced disasters in Guangdong Province

等级	TC 过程经济灾损率	TC 过程人口受灾率
低	$\leq 0.02\%$	$\leq 0.02\%$
较低	(0.02%, 0.1%]	(0.02%, 1%]
中	(0.1%, 0.5%]	(1%, 6%]
较高	(0.5%, 4%]	(6%, 35%]
高	$> 4\%$	$> 35\%$

2004~2013 年, 广东省平均每次 TC 过程造成的经济灾损率在粤西和粤东较重, 平均每次达到 0.5%以上, 其中粤东部分地区达 4.0%以上; 而珠三角平均每次的 TC 经济灾损率相对较小 (图 4a)。从平均每次 TC 过程造成的人口受灾率来看, 广东各地区的受灾频次仍然是粤西和粤东较重, 达 6%以上, 其中粤东南部部分地区达 35%以上; 而珠三角及粤北 (清远、云浮、韶关、河源、梅州、肇庆) 的人口受灾率相对较小 (图 4b)。可见, 广东各地区 TC 灾害造成的经济灾损率和人口受灾率空间分布不均匀, 与 TC 灾害发生频次、强度以及承灾体暴露度等均有密切关系。

3.3 TC 经济灾损率评估模型

TC 致灾的主要两个气象要素是降水和东风。TC 灾害损失与 TC 过程降水量、最大日降水量以及日最大风速的关系较为密切 (陈佩燕等, 2009)。

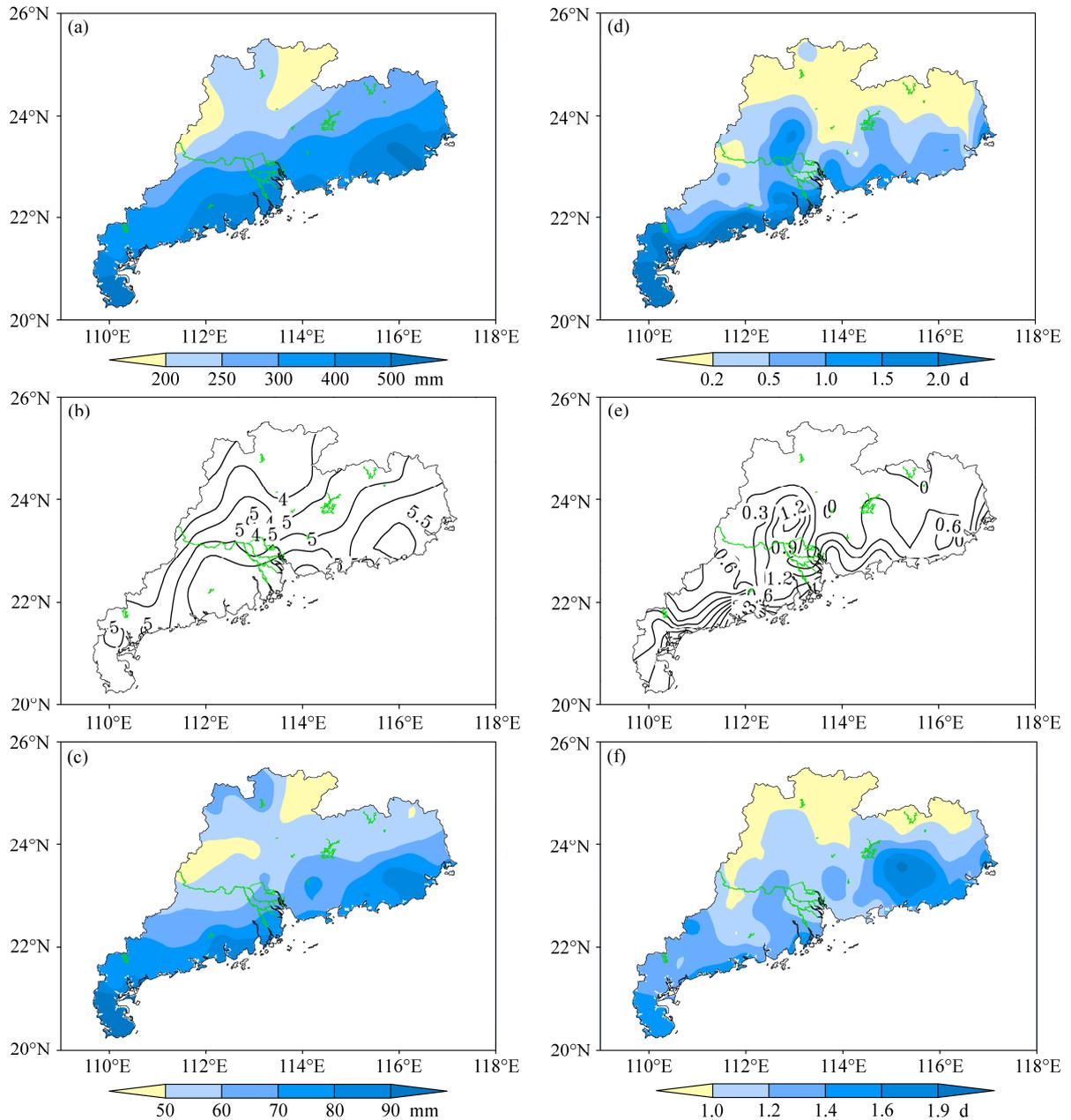


图3 2004~2013年广东省TC造成的(a)年平均降水量、(b)年平均降水频次、(c)平均每次过程降水量、(d)年平均大风日数、(e)年平均大风频次和(f)平均每次过程大风日数

Fig. 3 (a) Annual average precipitation, (b) annual average precipitation frequency, (c) averaged total rainfall during each process, (d) annual average number of gale days, (e) annual average occurrence frequency of gales, and (f) averaged number of gale days during each process induced by TCs in Guangdong Province during 2004–2013

此外，产生风灾的风力等级一般在6级及以上（Pielke and Landsea, 1998; Ren et al. 2007; Pielke et al., 2008; 陆逸等, 2016）。因此，挑选TC过程降水量、最大日降水量、暴雨量、暴雨日数、日最大风速和6级以上大风日数作为TC灾害的致灾因子，并用于演化建模研究。由图2可见，广东内陆地区大风较少出现，TC灾害主要由降水引起。由

于广东省各地区地理环境、社会经济发展条件等存在着较大差异，导致相同的气象致灾因子在不同地区可能造成不同程度的灾害损失。因此，将广东省分为粤西、珠三角、粤东和粤北4个区域分别进行演化建模研究，建立TC经济损失率的评估模型。

对广东省的每个区域，首先基于TC经济损失率数据，经过演化建模算法得到一系列评估方程，

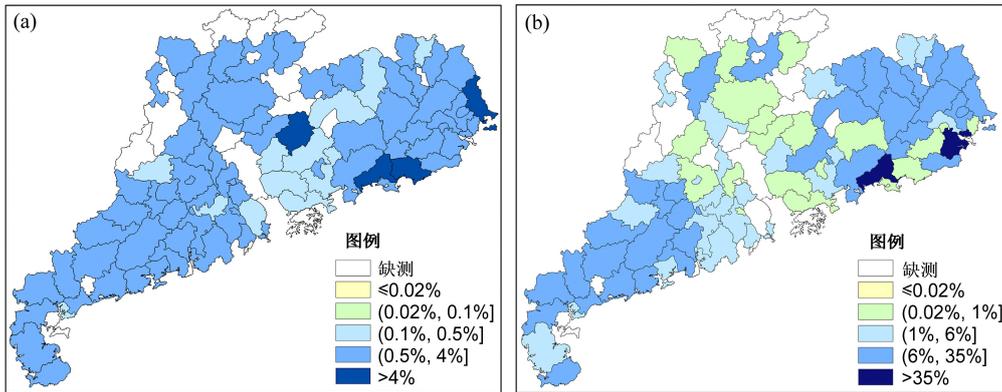


图4 2004~2013年广东省平均每次TC过程造成的(a)经济灾损率和(b)人口受灾率
Fig. 4 (a) Economic loss rate and (b) population rate affected during each TC process in Guangdong Province averaged over 2004–2013

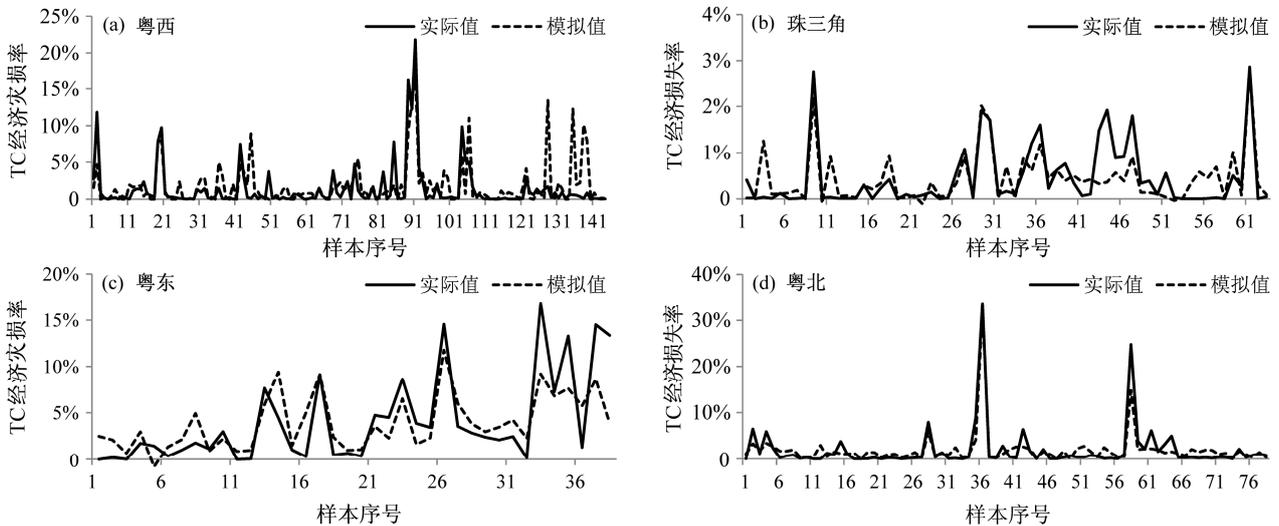


图5 广东省(a)粤西、(b)珠三角、(c)粤东和(d)粤北县域单元TC经济损失率的实际值与模拟值
Fig. 5 Actual values and simulated values corresponding to economic loss rates caused by TCs on county level in individual regions of (a) western Guangdong, (b) the Pearl River Delta, (c) eastern Guangdong, and (d) northern Guangdong

进而从中挑选出模拟效果相对最好的1个一阶常微分方程。再利用该方程对广东各区域县域单元TC经济损失率进行模拟(图5)。广东省县域单元TC经济损失率的实际值与观测值呈一致性变化特征,相关系数在粤北最大为0.93,其次是珠三角和粤东,为0.78,粤西地区为0.66(显著性水平 $\alpha=0.05$)。

表2 广东各区域TC经济灾损率实际值和模拟值对比
Table 2 Comparison of actual values and simulated values corresponding to TC-induced economic loss rates in different regions of Guangdong Province

区域	实际平均值	模拟平均值	实际方差	模拟方差
粤西	1.39%	1.8%	3.05%	3.0%
珠三角	0.45%	0.44%	0.68%	0.57%
粤东	4.06%	3.91%	4.67%	2.9%
粤北	1.97%	2.0%	4.85%	3.92%

表2给出了广东各区域TC经济损失率实际值与模拟值的对比。各个区域中,县域单元TC经济灾损率平均值在粤东地区最大,珠三角最小,TC经济灾损率方差也在粤东最大,珠三角最小。TC经济损失率的模拟值也能反映相似的特征。与实际值相比,模拟的平均值在珠三角地区最接近实际,方差在粤西地区最接近实际。总体来看,利用演化建模方法对TC经济损失率的模拟结果与观测值基本一致。

为了研究演化建模方法建立的评估模型对TC经济损失率的预估效果,在广东各区域分别进行了独立样本检验,其中粤西29个样本,粤北和珠三角20个样本,粤东受总样本量偏少影响,选取了10个独立样本。TC经济损失率的预估值与实际值

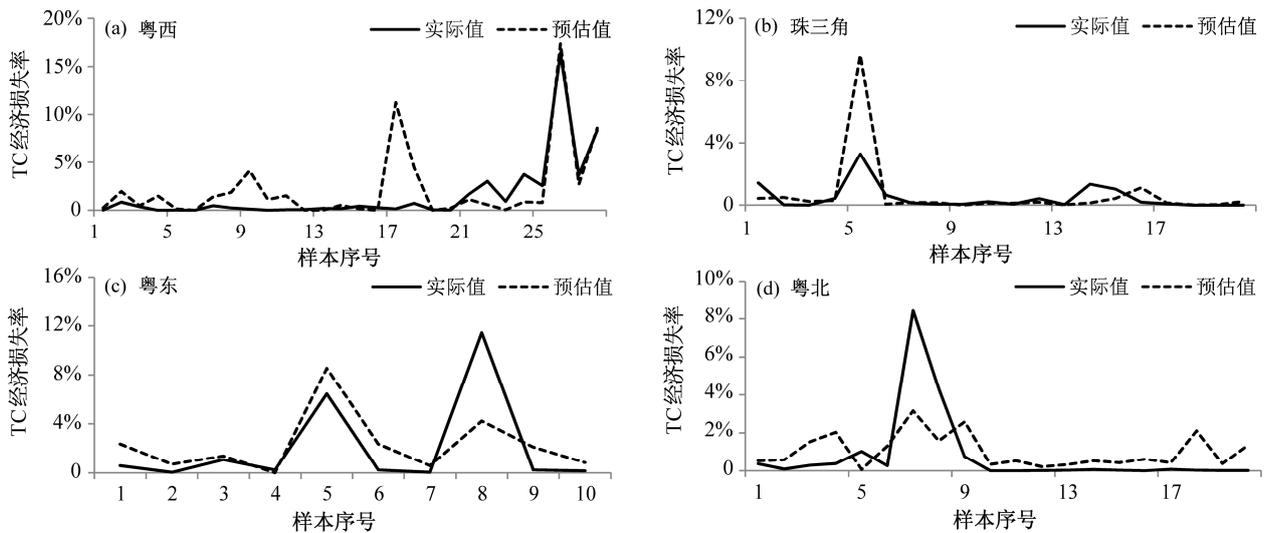


图6 广东省 (a) 粤西、(b) 珠三角、(c) 粤东和 (d) 粤北县域单元 TC 经济损失率的实际值 (蓝色) 与预估值 (红色)

Fig. 6 Actual values (blue curved lines) and pre-evaluated values (red curved lines) of economic loss caused by TCs on county level in various regions of (a) western Guangdong, (b) the Pearl River Delta, (c) eastern Guangdong, and (d) northern Guangdong

的相关系数在珠三角地区最大为 0.84, 其次是粤西地区 0.78, 粤东地区为 0.7, 粤北地区为 0.61 (显著性水平 $\alpha=0.05$, 见图 6)。这表明, 该评估模型对广东各区域 TC 经济损失率的预评估结果亦较为可靠。

4 总结

本文利用 2004~2013 年影响广东的 TC 气象和灾情资料, 分析了广东省 TC 降水、大风、经济损失率以及人口受灾率的空间分布特征。研究表明, TC 降水和大风在粤东和粤西影响频繁, 而粤北和珠三角地区受 TC 影响相对较小。通过分析每次 TC 经济灾损率和人口受灾率发现, 广东省县域单元的经济灾损率低于 0.5% 占总样本数的 60%, 其中仅有 10% 的经济灾损率超过 4%; 县域 TC 人口受灾率在 6% 以下的占总样本数的 60%, 其中仅有 10% 的人口受灾率超过了 35%。平均每次 TC 经济灾损率和人口受灾率在粤西和粤东较重, 尤其是粤东沿海地区, 而在珠三角和粤北较轻。

基于一种具有自组织、自适应和自学习等特征的演化建模方法, 本文探讨了其在 TC 灾害评估中的可能应用。利用演化建模方法建立了 TC 经济损失率评估模型, 发现该方法得到的非线性动力学方程能够较好地模拟广东省各区域的 TC 经济损失率, 相关系数均在 0.66 以上 (显著性水平 $\alpha=0.05$)。对广东各区域 TC 经济损失率预评估的独立样本检

验试验表明, 预估值与实际值的相关系数在 0.61 以上 (显著性水平 $\alpha=0.05$)。

利用模糊层次综合评价法建立的浙江省 TC 灾害影响评估指数与实际直接经济损失的相关系数为 0.79 (张颖超和仲丽君, 2013); 利用模糊数学方法建立的广东省 TC 经济损失评估模型与实际的经济损失拟合率为 80% (樊琦和梁必骐, 2000)。本文利用演化建模方法建立的评估模型在广东省粤北地区的模拟效果比这些研究结果偏好, 但在粤西偏差, 预评估结果在珠三角偏好, 粤北偏差。其原因一方面在于所获取的资料的质量问题, 尤其是数据的准确性; 另一方面, 在建模过程中, 本来仅主要考虑了降水和大风两个气象要素, 其实造成灾害损失大小与承载体的脆弱性, 各种应对措施、预报预警能力等都有着很大的关系。此外, 演化建模得到的微分方程结构较为复杂, 难以据此给出合适的物理解释。总体来看, 通过对广东省县域单元 TC 经济损失率的模拟和预评估试验, 表明演化建模方法能够有效挖掘数据的总体演变趋势, 具有很强的实用性。在今后的研究中, 要着重考虑如何将承载体的脆弱性, 各种应对措施、预报预警能力等因素考虑到灾害影响评估模型中, 以便减小模式的模拟和预估偏差。

此外, 已有的研究表明, 适当改变演化算法中的参数, 对于模型的拟合效果和预测检验效果的影响有限, 说明演化算法的建模效果具有一定的鲁棒性。而且, 其对建模样本量的要求也较小, 少

量的样本量一样可以获得较好的模拟和预测效果 (王柳等, 2014; Wang et al., 2015; He et al., 2016), 这也是演化算法在时间序列建模和参数估计领域中的一个很大的优势所在。

参考文献 (References)

- 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 2009. 我国台风灾害成因分析及灾情预估 [J]. 自然灾害学报, 18 (1): 64–73. Chen Peiyan, Yang Yuhua, Lei Xiaotu, et al. 2009. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 18 (1): 64–73, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2009.01.010.
- 丁瑞强, 李建平. 2008. 混沌系统可预报期限随初始误差变化规律研究 [J]. 物理学报, 57 (12): 7494–7499. Ding Ruiqiang, Li Jianping. 2008. Study on the regularity of predictability limit of chaotic systems with different initial errors [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (12): 7494–7499, doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2008.12.014.
- Ding R Q, Li J P, Li B S. 2017. Determining the spectrum of the nonlinear local Lyapunov exponents in a multidimensional chaotic system [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 34: 1027–1034, doi:10.1007/s00376-017-7011-8.
- 樊琦, 梁必骥. 2000. 热带气旋灾情的预测及评估 [J]. 地理学报, 55 (S1): 52–56. Fan Qi, Liang Biqi. 2000. The evaluation of disastrous losses caused by tropical cyclones [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (S1): 52–56, doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2000.z1.008.
- 国家统计局农村社会经济调查司. 2004~2014. 中国县域统计年鉴 (县市卷) [M]. 北京: 中国统计出版社, 323–429. Department of rural social and economic investigation of the National Bureau of Statistics. 2004–2014. County Statistical Yearbook in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Statistics Press, 323–429.
- 何彩芬, 钱燕珍. 2002. 2000 年浙江省热带气旋灾情评估 [J]. 浙江气象, 23 (2): 4–6, 19. He Caifen, Qian Yanzen. 2002. The evaluation of disaster caused by tropical cyclones in Zhejiang Province in 2000 [J]. Journal of Zhejiang Meteorology (in Chinese), 23 (2): 4–6, 19, doi:10.3969/j.issn.1004-5953.2002.02.002.
- 何文平, 王柳, 万仕全, 等. 2012. 旱涝预测的演化建模方法 [J]. 物理学报, 61(11): 119201. He Wenping, Wang Liu, Wan Shiquan, et al. 2012. Evolutionary modeling for dryness and wetness prediction [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 61 (11): 119201, doi:10.7498/aps.61.119201.
- He W P, Wang L, Jiang Y D, et al. 2016. An improved method for nonlinear parameter estimation: a case study of the Rössler model [J]. Theor. Appl. Climatol., 125 (3): 521–528, doi:10.1007/s00704-015-1528-5.
- 胡娅敏, 宋丽莉, 刘爱君, 等. 2008. 近 58 年登陆我国热带气旋的气候特征分析 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 47 (5): 115–121. Hu Yamin, Song Lili, Liu Aijun, et al. 2008. Analysis of the climatic features of landfall tropical cyclones in China during the past 58 years [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 47 (5): 115–121, doi:10.3321/j.issn:0529-6579.2008.05.024.
- 胡娅敏, 宋丽莉, 罗晓玲. 2011. 近 58 年登陆广东热带气旋位置和生成源地的变化 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 50 (4): 113–120. Hu Yamin, Song Lili, Luo Xiaoling. 2011. The Variation of the location and source region of tropical cyclones making landfall in Guangdong over the past 58 years [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 50 (4): 113–120.
- 李春梅, 罗晓玲, 刘锦奎, 等. 2006. 层次分析法在热带气旋灾害影响评估模式中的应用 [J]. 热带气象学报, 22 (3): 223–228. Li Chunmei, Luo Xiaoling, Liu Jinlun, et al. 2006. Application of analytical hierarchy process in the assessment model on tropical cyclone disaster's influence [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (3): 223–228, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.03.003.
- 李倩, 张韧, 姚雪峰, 等. 2013. 气候变化背景下我国周边海域热带气旋灾害风险评估与区划 [J]. 热带气象学报, 29 (1): 143–148. Li Qian, Zhang Ren, Yao Xuefeng, et al. 2013. Risk assessment and regionalization of tropical cyclone disaster over China's surrounding sea [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (1): 143–148, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.01.018.
- 李艳兰, 欧艺, 周绍毅, 等. 2008. 广西热带气旋灾害评估系统的开发与应用 [J]. 气象研究与应用, 29 (4): 1–3. Li Yanlan, Ou Yi, Zhou Shaoyi, et al. 2008. Research and application of tropic cyclone disaster evaluation system of Guangxi [J]. Journal of Meteorological Research and Application (in Chinese), 29 (4): 1–3.
- 林继生, 罗金铃. 1995. 登陆广东的热带气旋灾害评估和预测模式 [J]. 自然灾害学报, 4 (1): 92–97. Lin Jisheng, Luo Jinling. 1995. The evaluation and forecasting models of tropical cyclone disaster landing on Guangdong Province [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 4 (1): 92–97, doi:10.13577/j.jnd.1995.0115.
- 娄伟平, 陈海燕, 郑峰, 等. 2009. 基于主成分神经网络的台风灾害经济损失评估 [J]. 地理研究, 28 (5): 1243–1254. Lou Weiping, Chen Haiyan, Zheng Feng, et al. 2009. Economic loss assessment of typhoon based on principal component analysis and neural network [J]. Geographical Research (in Chinese), 28 (5): 1243–1254, doi:10.3321/j.issn:1000-0585.2009.05.011.
- Lou W P, Chen H Y, Shen X L, et al. 2012. Fine assessment of tropical cyclone disasters based on GIS and SVM in Zhejiang Province, China [J]. Natural Hazards, 64: 511–529, doi:10.1007/s11069-012-0254-x.
- 陆逸, 朱伟军, 任福民, 等. 2016. 1980~2014 年中国台风大风和台风极端大风的变化 [J]. 气候变化研究进展, 12 (5): 413–421. Lu Yi, Zhu Weijun, Ren Fuming, et al. 2016. Changes of tropical cyclone high winds and extreme winds during 1980–2014 over China [J]. Climate Change Research (in Chinese), 12 (5): 413–421, doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2016.030.
- 马青云, 李佳英, 王秀荣, 等. 2008. 基于模糊综合评价法的登陆台风灾害影响评估模型 [J]. 气象, 34 (5): 20–25. Ma Qingyun, Li Jiaying, Wang Xiurong, et al. 2008. A fuzzy synthetic evaluation model for typhoon disaster [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (5): 20–25.
- Pielke R A Jr, Landsea C W. 1998. Normalized hurricane damages in the United States: 1925–95 [J]. Wea. Forecasting, 13: 621–631, doi:10.1175/1520-0434(1998)013<0621:NHDITU>2.0.CO;2.
- Pielke R A Jr, Gratz J, Landsea C W, et al. 2008. Normalized hurricane damage in the United States: 1900–2005 [J]. Natural Hazards Review, 9: 29–42, doi:10.1061/(ASCE)1527-6988(2008)9:1(29).
- 钱燕珍, 何彩芬, 杨元琴, 等. 2001. 热带气旋灾害指数的估算与应用方法 [J]. 气象, 27 (1): 14–18, 24. Qian Yanzen, He Caifen, Yang Yuanqin,

- et al. 2001. An assessment of damage index for tropical cyclones [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 27 (1): 14–18, 24, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2001.01.003.
- 任福民, Gleason B, Easterling D. 2001. 一种识别热带气旋降水的数值方法 [J]. *热带气象学报*, 17 (3): 308–313. Ren Fuming, Gleason B, Easterling D. 2001. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 17 (3): 308–313, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.03.015.
- Ren F M, Wang Y M, Wang X L, et al. 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24: 700–711, doi:10.1007/s00376-007-0700-y.
- 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等. 2008. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系 [J]. *气象学报*, 66 (2): 224–235. Ren Fuming, Wang Xiaoling, Chen Lianshou, et al. 2008. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (2): 224–235, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.02.009.
- Vickery P J, Skerplj P F, Lin J, et al. 2006. Hazus-MH hurricane model methodology. II: Damage and loss estimation [J]. *Natural Hazards Review*, 7: 94–103.
- Wan S Q, He W P, Wang L, et al. 2012. Evolutionary modeling-based approach for model errors correction [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 19: 439–447, doi:10.5194/np-19-439-2012.
- Wang L, He W P, Liao L J, et al. 2015. A new method for parameter estimation in nonlinear dynamical equations [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 119: 193–202, doi:10.1007/s00704-014-1113-3.
- 王柳, 何文平, 万仕全, 等. 2014. 混沌系统中参数估计的演化建模方法 [J]. *物理学报*, 63 (1): 019203. Wang Liu, He Wenping, Wan Shiquan, et al. 2014. Evolutionary modeling for parameter estimation for chaotic system [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 63 (1): 019203, doi:10.7498/aps.63.019203.
- 王小玲, 任福民. 2008. 1951~2004 年登陆我国热带气旋频数和强度的变化 [J]. *海洋预报*, 25 (1): 65–73. Wang Xiaoling, Ren Fuming. 2008. Variations in frequency and intensity of landfall tropical cyclones over China during 1951–2004 [J]. *Marine Forecasts* (in Chinese), 25 (1): 65–73, doi:10.3969/j.issn.1003-0239.2008.01.010.
- 王小玲, 王咏梅, 任福民, 等. 2006. 影响中国的台风频数年代际变化趋势: 1951~2004 年 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (3): 66–69. Wang Xiaoling, Wang Yongmei, Ren Fumin, et al. 2006. Interdecadal variations in frequencies of typhoons affecting China during 1951–2004 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2 (3): 66–69, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.z1.013.
- Watson C C Jr, Johnson M E. 2004. Hurricane loss estimation models: Opportunities for improving the state of the art [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85: 1713–1726, doi:10.1175/BAMS-85-11-1713.
- 俞康庆, 周月华, 杨荆安, 等. 2005. 气象要素时间序列的演化建模分析与短期气候预测 [J]. *干旱气象*, 23 (4): 1–6, 11. Yu Kangqing, Zhou Yuehua, Yang Jing'an, et al. 2005. The evolutionary modeling and short-range climatic prediction for meteorological element time series [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 23 (4): 1–6, 11, doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2005.04.001.
- 郁亚娟, 郭怀成, 刘永, 等. 2007. 城市生态系统的动力学演化模型研究进展 [J]. *生态学报*, 27 (6): 2603–2614. Yu Yajuan, Guo Huaicheng, Liu Yong, et al. 2007. On the progress in urban ecosystem dynamic modeling [J]. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 27 (6): 2603–2614, doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2007.06.055.
- Zhang X C, Lou W P. 2010. Estimation of the number of collapsed houses damaged by typhoon based on principal components analysis and support vector machine [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 1 (4): 11–14.
- 张颖超, 仲丽君. 2013. 基于灰关联和回归分析的台风灾害损失研究与分析 [J]. *热带气象学报*, 29 (4): 665–671. Zhang Yingchao, Zhong Lijun. 2013. The research and analysis on typhoon disasters based on grayness correlation and regression analysis [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 29 (4): 665–671, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2013.04.016.
- 赵珊珊, 任福民, 高歌, 等. 2015. 近十年我国热带气旋灾害的特征研究 [J]. *热带气象学报*, 31 (3): 424–432. Zhao Shanshan, Ren Fumin, Gao Ge, et al. 2015. Characteristics of Chinese tropical cyclone disaster in the past 10 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 31 (3): 424–432, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2015.03.014.
- 中国气象局. 2005~2015. 台风年鉴 (2004~2014)[M]. 北京: 气象出版社, 1–20. China Meteorological Administration. 2004–2014. *Typhoon Yearbooks* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–20.
- 朱婧, 陆逸, 李国平, 等. 2017. 基于县级分辨率的福建省台风灾害风险评估 [J]. *灾害学*, 32 (3): 204–209. Zhu Jing, Lu Yi, Li Guoping, et al. 2017. Risk assessment of typhoon disasters in Fujian Province of each county [J]. *Journal of Catastrophology* (in Chinese), 32 (3): 204–209, doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2017.03.034.