

中国台风灾害直接经济损失的主导影响因子 评估与识别

徐金勤¹ 申丹娜^{2*} 王晴³ 孟明明⁴

(1 广东省气象服务中心, 广州 510640; 2 中国气象局气象发展与规划院, 北京 100081;

3 国家气象中心, 北京 100081; 4 北京林业大学 经济管理学院, 北京 100083)

摘要 基于 2004—2021 年 125 个中国台风灾情资料以及地面气象站风雨观测数据和社会经济统计数据, 综合考虑致灾因子、承灾体和防灾减灾能力构建台风灾害直接经济损失评估模型, 并在此基础上量化研究影响中国台风灾害直接经济损失的主导因子。结果表明: 在 2004—2021 年期间, 中国台风定基直接经济损失和台风风雨强度均呈现下降趋势。以 2012 年(台风路径集合预报实时订正技术启用年)为界, 台风大风指数是 2004—2011 年期间对台风灾害经济损失贡献量最大的影响因子, 但在 2012 年之后, 却是贡献量最小的因子; 台风降雨指数、地区 GDP(Gross Domestic Product)总和、台风强度预报误差和排水管道密度因子对台风灾害经济损失的贡献在 2012 年之后均明显增加, 并且台风强度预报误差的降低和排水管道密度的显著增加是 2012—2021 年期间台风灾害经济损失下降的主导要素。本研究发现我国台风灾害经济损失的主导影响因子在不同研究时段内存在差异, 提高台风强度预报水平和改善排水设施等防灾减灾能力可有效降低台风灾害经济损失。

关键词 台风灾害; 直接经济损失; 评估模型; 主导影响因子

中图分类号: P49 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20230370 **文献标识码:** A

引言

中国东临太平洋, 极易遭受台风天气的袭击与影响, 这对中国东部和南部沿海地区的社会和经济造成严重影响^[1-3]。据统计, 2000—2016 年登陆中国的台风平均每年约有 8 次, 并且平均每次台风导致的经济损失达 61.48 亿元^[4]。在全球气候变暖背景下, 气候系统不稳定性程度加大, 极端台风出现频率显著增加^[5-6], 造成多地区强风和特大暴雨等灾害性天气^[7-10], 对国家社会经济的可持续发展造成严重威胁。

台风灾情评估研究是国内外台风灾害研究的重点和热点, 已取得大量研究成果。台风灾害损失评估主要是通过构建评估模型, 对台风灾后或灾前损失进行评估^[11]。国内关于台风灾害损失评估的主要方法有多元回归法^[12-13]、模糊评价法^[14-16]、灰色关联法^[17-18]、神经网络法^[19-21]、信息扩散法^[22]等, 基

于上述方法对台风灾情的评估与预估效果均得到了有效的检验。在选取台风灾情影响因子上主要分为两类研究, 一类研究仅选取台风大风、降雨和登陆强度等致灾因子^[23-27], 侧重于分析台风灾情与气象要素间的关系; 另一类是基于灾害风险理论, 从致灾因子、孕灾环境、承灾体和防灾减灾能力中挑选影响因子^[28-31], 综合性评估台风灾害对区域灾损的风险。上述研究中在选择防灾减灾能力指标时多侧重于地区财政水平和减灾设施能力方面, 考虑台风预报准确率因子对台风灾损影响的研究较为缺乏。

从灾害风险理论角度来看, 影响台风灾害损失的因子众多, 但关于台风灾害损失影响因子的量化研究鲜有报道。那么, 不同因子对于台风灾害损失的具体影响程度如何量化, 哪一项因子的影响占据主导地位。本研究以台风灾害直接经济损失为研究对象, 综合考虑台风致灾因子、承灾体和防灾减灾能力, 量化分析 2004—2021 年期间中国台风直接

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

中国气象局气象发展与规划院重点研究项目(ZDXM2023003)资助

作者简介: 徐金勤, 女, 1995 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事气象灾害影响评价研究, Email: xujinqin0307@163.com

收稿日期: 2023 年 11 月 1 日; 定稿日期: 2024 年 8 月 14 日

* 通信作者, Email: s.dn@163.com

©《气象科技》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

经济损失的影响因子,研究结果可加深对台风灾害形成机理的理解,为防台减灾工作的部署与规划提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 数据来源

2004—2021 年各个台风灾情数据来源于中国气象局《中国气象灾害年鉴》和应急管理部减灾中心,为逐省份统计资料。台风路径和强度预报数据来源于中央气象台发布的台风路径预报资料(<http://typhoon.nmc.cn/web.html>)。台风最佳路径数据集(即台风位置和强度实况数据集),来源于中国气象局热带气旋资料中心(<https://tcdata.typhoon.org.cn/>)。2004—2021 年各个台风期间的风雨实况监测资料来源于国家气象观测站的历史监测资料,由国家气象中心(中央气象台)提供。受台风影响的各省份 GDP(Gross Domestic Product)、排水管道密度等其他社会经济统计数据来源于中国统计局(<http://www.stats.gov.cn/>)。根据各个台风所影响的地区(省份)范围,统计各个台风过程所有影响省份的直接经济损失总和、当年 GDP 总和、平均排水管道密度。经过上述各种数据匹配,最终筛选得到 125 条完整的台风数据。因资料缺失,本研究区不包括中国台湾省、香港和澳门特区。

从 2012 年起,中央气象台开始将台风路径集合预报实时订正技术进行业务化应用,显著提升了台风预报的准确率^[32-33]。为了对比分析台风预报水平提高对于台风灾害经济损失降低的效益程度,本研究以 2012 年为界,将研究年限分为两个时间段,即 2001—2011 年和 2012—2021 年。

1.2 研究方法

1.2.1 台风灾害经济损失的影响因子选取

基于灾害风险理论,综合考虑致灾因子、承灾体和防灾减灾能力来确定台风灾损(直接经济损失)的影响因子。①台风致灾因子:台风过程日最大雨量、台风过程累计最大雨量、 ≥ 50 mm 降雨的测站总数、 ≥ 8 级大风的测站总数、过程极大风速;②承灾体暴露度因子:台风过程所有影响地区(省份)的当年 GDP 总和(简称为区域 GDP 总和);③防灾减灾能力因子:台风 24 h 强度预报误差、排水管道密度。

利用 Pearson 相关系数分析台风灾害直接经济

损失与上述致灾因子、承灾体和防灾减灾能力因子的相关性程度。

1.2.2 定基直接经济损失

为消除物价涨落影响,使得不同年份的直接经济损失数据具备可比性,利用定基物价比系数将直接经济损失计算得到定基直接经济损失^[34],计算公式如下:

$$L_{BE} = \epsilon L_E \quad (1)$$

式中, L_{BE} 和 L_E 分别表示定基直接经济损失和直接经济损失; ϵ 表示定基物价比系数,该系数是一种用于衡量价格水平变化的经济指标,在经济学上是指当前时期的价格水平与某一固定时期物价水平的比值,该固定时期称为基准时期,基准时期的比值为 1.0,本研究将 2021 年设定为基准时期,将其他各年的直接经济损失订正到基准年(2021 年)的物价水平。

1.2.3 评估模型构建

综合考虑台风过程中的风雨强度及其影响范围,采用加权综合评价法构建台风降雨指数和大风指数,公式如下:

$$I_i = \sum_{j=1}^m \ln(X_{ij}) \omega_{ij} \quad (2)$$

式中, I_i 表示第 i 种评价指数, X_{ij} 表示 i 指数的具体要素 j ; ω_{ij} 表示 i 指数具体要素 j 的权重系数,其中台风过程日最大雨量、台风过程累计最大雨量、 ≥ 50 mm 降雨的测站总数、 ≥ 8 级大风的测站总数、过程极大风速的权重系数分别为 0.4、0.2、0.4、0.5、0.5; m 表示各个评价指数包含的具体要素个数。

以台风灾害直接经济损失作为因变量,其他影响因子作为自变量,构建回归模型,具体方程如下:

$$\ln(L_{BE}) = \beta_1 I_{wind} + \beta_2 I_{rain} + \beta_3 \ln(G) + \beta_4 \ln(E) + \beta_5 \ln(D) + \partial_0 \quad (3)$$

式中, I_{rain} 、 I_{wind} 分别表示台风降雨指数、台风大风指数; G 为每次台风所有影响地区的 GDP 总和; E 为台风强度预报误差; D 为排水管道密度; ∂_0 为残差项; β_i ($i=1, \dots, 5$) 为弹性(回归)系数^[35],表示在其他自变量因子不变的条件下,某一自变量因子每增加(或减少)1%将会使因变量升高(或降低) β_i %。

1.2.4 贡献分析方法

为了明确影响中国 2004—2021 年期间台风灾害经济损失的主导因子,需要将不同因子对台风灾害经济损失的影响(贡献)进行量化,具体计算方案

如下:

首先,计算各因子,即台风降雨指数(I_{rain})、台风大风指数(I_{wind})、地区 GDP 总和(G)、台风强度预报误差(E)、排水管道密度(D)的相对变化量,计算公式如下:

$$R_i = \frac{yC_i}{|a_i|} \times 100\% \quad (4)$$

式中, R_i 表示第 i 个因子的相对变化量(%); y 表示研究年限(年数); C_i 表示在研究年限内第 i 个因子的年际变化率; a_i 表示研究年限内第 i 个因子的平均值。

其次,将式(3)中各因子的弹性系数 β_i 与式(4)中相应各因子的相对变化量 R_i 相乘,即得到各因子对台风直接经济损失相对变化的贡献 N_i :

$$N_i = \beta_i R_i \quad (5)$$

其中,对减少(增加)台风灾害损失的贡献因子即为正(负)效益影响因子,并且根据贡献程度确定影响中国 2004—2021 年期间台风灾害损失的主导因子。

2 结果分析

2.1 相关性结果分析

由台风灾害定基直接经济损失与各个影响因子间的相关性结果(表 1)可见,台风灾害定基直接经济损失与台风过程日最大雨量、台风过程累计最大雨量、 ≥ 50 mm 降雨的测站总数、 ≥ 8 级大风的测站总数、过程极大风速、地区 GDP 总和之间存在显著的正相关关系,均通过了 0.01 的显著性水平检验。台风过程日最大雨量主要集中在 100~500 mm(图 1a),过程累计最大雨量集中在 100~700 mm(图 1b), ≥ 50 mm 降雨的测站总数和 ≥ 8 级大风的测站总数分别集中在 250 和 120 个以内(图 1c,d),过程极大风速主要在 20~55 m/s(图 1e),地区 GDP 总和集中在 30 万亿元以内(图 1f)。

由表 1 可见,台风灾害定基直接经济损失与台风 24 h 强度预报误差呈现显著正相关($p < 0.01$),随 24 h 强度预报误差的增加呈现明显的增加趋势(图 1g),这说明台风强度预报准确率的提高可以降低台风灾害造成的经济损失。台风灾害定基直接经济损失与排水管道密度存在显著负相关,其随着排水管道密度的增加呈现明显减少趋势(图 1h),说明提高区域防灾减灾能力建设在一定程度上也会降低台风灾害造成的经济损失。

表 1 台风灾害定基直接经济损失与各影响因子间的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between fixed base direct economic losses of typhoon disaster and each impact factor

	影响因子	相关系数
致灾因子	过程日最大雨量	0.56**
	过程累计最大雨量	0.46**
	≥ 50 mm 降雨测站总数	0.66**
	≥ 8 级大风测站总数	0.66**
承灾体	过程极大风速	0.57**
	地区 GDP 总和	0.47**
防灾减灾能力	台风 24 h 强度预报误差	0.36**
	排水管道密度	-0.22*

注:*表示通过 0.05 显著性检验;**表示通过 0.01 显著性检验。

2.2 趋势变化分析

由图 2 可见,近 18 年来,登陆中国的台风造成的定基直接经济损失整体上呈现逐年降低趋势,2004—2011 年期间台风灾害定基直接经济损失的逐年下降率为 22.05 亿元/a,明显高于 2012—2021 年的下降趋势率(10.39 亿元/a);其在 2011—2014 年快速增长,在 2019 年也出现陡然增长,而这些年份均出现了极端台风灾害事件并造成大规模经济损失,这可能是导致短期内台风灾害经济损失出现骤增的主要原因。

台风大风指数和降雨指数的逐年变化趋势较为特殊,在 2004—2011 年期间二者均呈现明显下降趋势,但在 2012—2021 年的下降趋势变弱(图 3a,b)。台风影响地区的 GDP 总和呈现逐年显著上升趋势,尤其是在 2012 年之后上升的程度加大(图 3c)。在 2012 年之前,台风强度预报误差的变化趋势不大,但在 2012 年之后呈现明显下降趋势(图 3d),这说明 2012 年之后台风预报技术水平得到了较大的提升。台风影响地区的排水管道密度在 2012 年之前的增加趋势相对较小,而在 2012 年之后增加幅度变大(图 3e)。

2.3 台风灾害定基直接经济损失建模分析

由表 2 可见,基于 2012 年前后两个研究时段构建的台风灾害定基直接经济损失评估模型均通过了 F 检验($p < 0.01$),模型结果具备可信性;并且,基于 2004—2011 年监测数据构建的模型拟合度为 0.80,略高于 2012—2021 年的模型拟合度。此外,

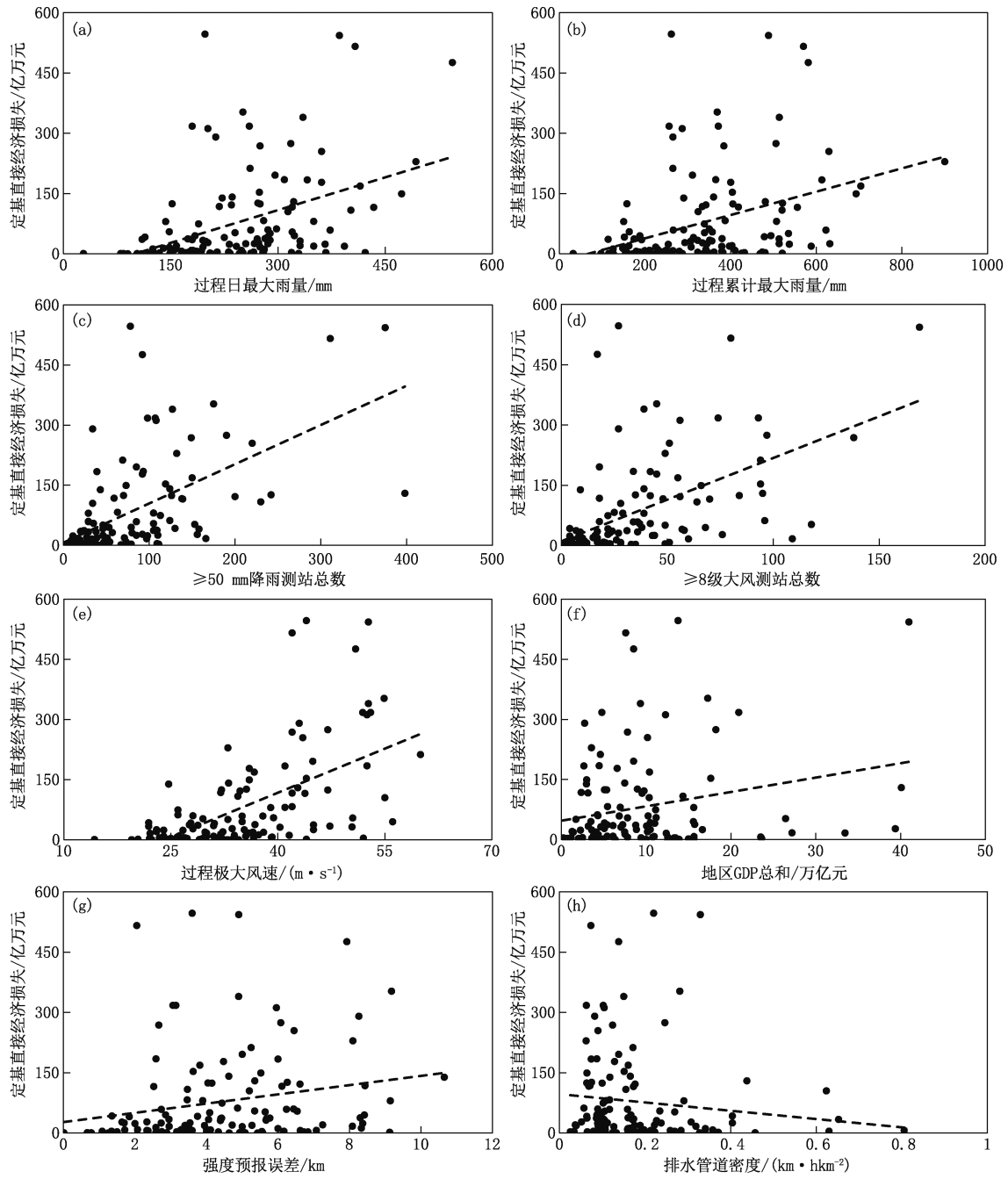


图 1 2004—2021 年中国台风灾害经济损失与台风过程日最大雨量(a)、台风过程累计最大雨量(b)、 ≥ 50 mm 降雨的测站总数(c)、 ≥ 8 级大风的测站总数(d)、过程极大风速(e)、地区 GDP 总和(f)、台风 24 h 强度预报误差(g)、排水管道密度(h)的关系

Fig. 1 Relationship between economic losses of typhoon disaster and maximum daily rainfall during typhoon (a), maximum cumulative rainfall during typhoon (b), total number of measuring stations with ≥ 50 mm rainfall (c), total number of measuring stations with ≥ 8 strong winds (d), maximum process wind speed (e), total regional GDP (f), typhoon 24 h intensity forecast error (g), drainage pipe density (h) in China from 2004 to 2021

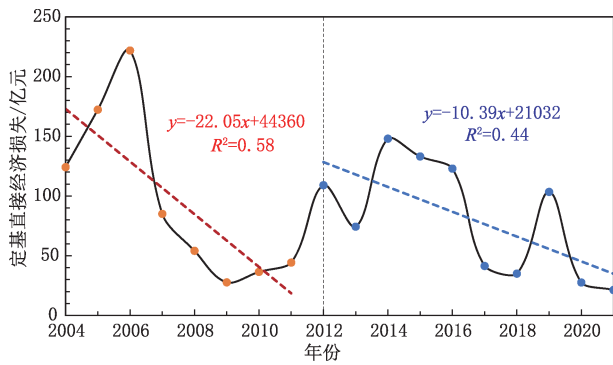


图 2 2004—2021 年中国台风灾害定基直接经济损失逐年均值变化

Fig. 2 Annual mean variation of fixed basis direct economic losses of typhoon disaster in China from 2004 to 2021

实际定基直接经济损失值与回归拟合测算出的定基直接经济损失值在 2004—2011 年期间的散点分布更为聚合,二者的均方根误差仅为 0.10,明显低于 2012—2021 年期间二者的均方根误差(图 4)。这说明基于不同研究时段内的历史监测数据构建的台风灾害经济损失评估模型存在较大差异。

从模型拟合系数来看,2004—2011 年期间,台风大风指数的拟合系数为 2.12,即在其他因子不变的情况下台风大风指数每增加 1%,台风定基直接经济损失随之增加 2.12%;台风降雨指数的拟合系数为 0.35,地区 GDP 总和的回归系数为 0.31,均未通过 0.05 的显著性水平检验;台风 24 h 强度误差、排水管道密度的拟合系数也均未达到 0.05 显著性水平检验。但在 2012—2021 年期间,台风大风指数

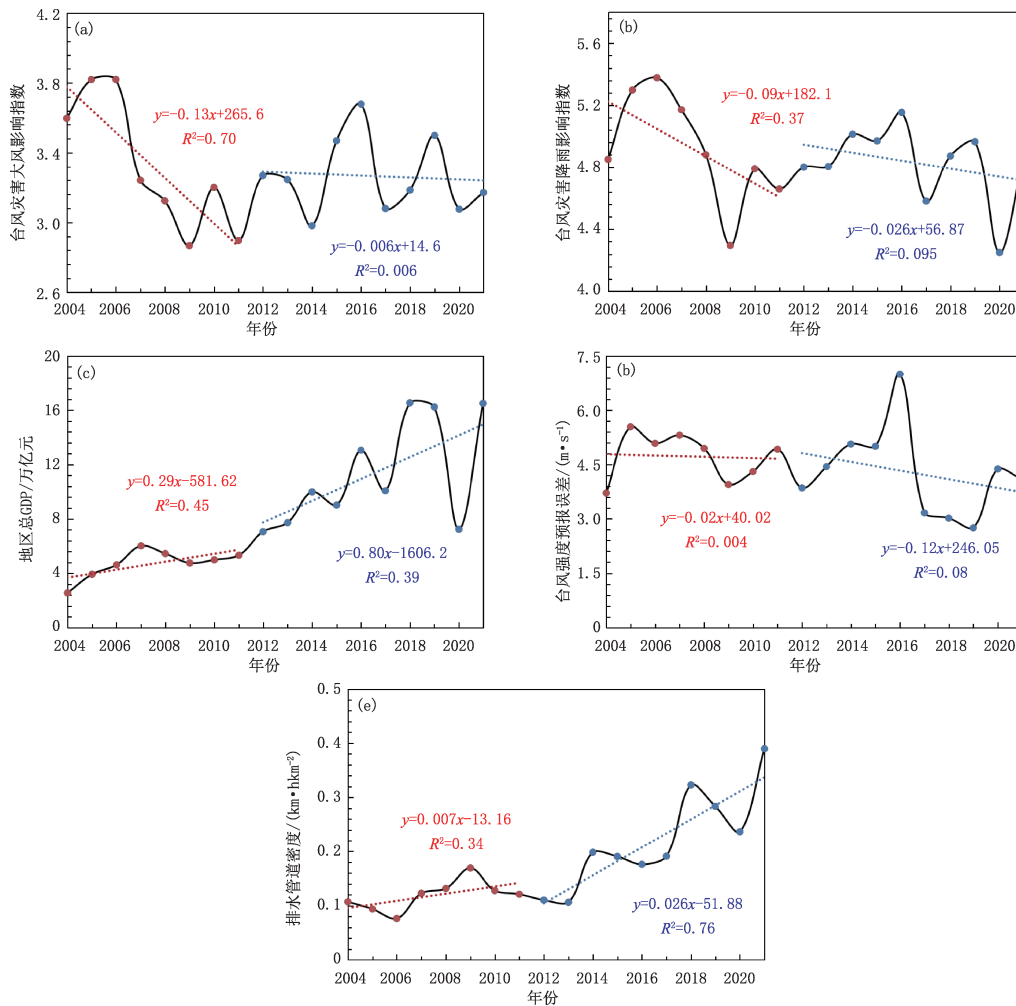


图 3 2004—2021 年中国台风大风指数(a)、台风降雨指数(b)、地区 GDP 总和(c)、台风 24 h 强度预报误差(d)、排水管道密度(e)逐年均值变化

Fig. 3 Annual mean variation of typhoon wind index (a), typhoon rain index (b), total regional GDP (c), typhoon 24 h intensity forecast error (d), drainage pipe density (e) in China from 2004 to 2021

的拟合系数仅为 0.57,而台风降雨指数、地区 GDP 总和、台风 24 h 强度误差和排水管道密度的拟合系数均通过了显著性检验。

表 2 台风灾害直接经济损失建模回归分析结果

Table 2 Results of regression analysis of direct economic losses modeling for typhoon disaster

建模因子	2004—2011 年	2012—2021 年
模型 F 检验	33.33**	25.87**
模型拟合度 R	0.89	0.81
台风大风指数	2.12**	0.57
台风降雨指数	0.35	1.79**
地区 GDP 总和	0.31	0.78**
台风 24 h 强度预报误差	0.30	0.61*
排水管道密度	-0.42	-1.13**

注: * 表示通过 0.05 显著性水平检验; ** 表示通过 0.01 显著性检验。

2.4 贡献评估结果分析

根据式(5)可以计算得到 2012 年前后两个研究时段内各个影响因子(即,台风降雨指数、台风大风指数、地区 GDP 总和、台风强度预报误差、排水管道密度)对台风定基经济损失相对变化的贡献(%),各个影响因子的相对贡献总和理论上应当与台风定基经济损失相对变化持平。分析 2012 年前后两个研究时段内台风灾害定基直接经济损失实际变化量与各个影响因子对其变化的贡献总和(表 3)可见,2004—2011、2012—2021 时间段内二者之间的相对误差分别仅有 8.9%、9.9%,误差相对较低,这表明贡献分析结果具备可靠性。

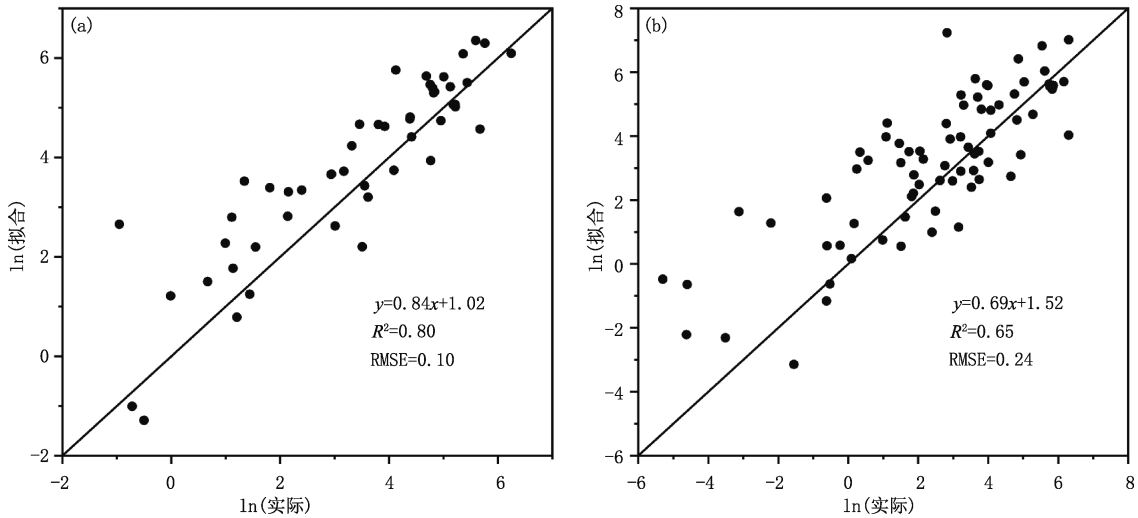


图 4 不同时期台风灾害实际定基直接经济损失对数值与回归拟合定基直接经济损失对数值对比:(a)2004—2011 年、(b)2012—2021 年

Fig. 4 Comparison between the actual fixed base direct economic losses of typhoon disaster and the calculated fixed base direct economic losses by regression fitting in different periods: (a) 2004—2011, (b) 2012—2021

表 3 贡献评估结果可靠性指标统计

Table 3 Reliability index statistics of contribution evaluation results

研究年限	定基直接经济损失 实际相对变化	各个因子的相 对贡献总和	二者相对误差 %
2004—2011	-96.7	-88.1	8.9
2012—2021	-111.7	-100.6	9.9

不同研究时间段内各影响因子对台风灾害经济损失相对变化的贡献存在较大差异(图 5)。2004—2011 年期间,台风大风指数对台风灾害经济损失降

低的贡献最大,数值高达 -74.6%。2012—2021 年期间,地区 GDP 总和显著增加导致台风灾害造成的经济损失体量增大,但是其他防灾减灾因子,即台风预报准确率、排水系统建设力度的显著提升大大降低了台风灾害经济损失,带来了显著的正效益。对比两个研究时段内各个因子的贡献发现,台风大风指数是 2004—2011 年期间对台风灾害经济损失贡献最大的影响因子,但在 2012 年之后,却成为贡献最小的因子,贡献仅为 -1.9%;同时,与 2004—2011 年期间相比,台风强度预报误差和排水管道密度因子在 2012—2021 年期间对台风灾害经济损失

的贡献程度大幅提升,贡献分别为 -26.3% 、 -70.6% ,成为该时期的主要影响因子。

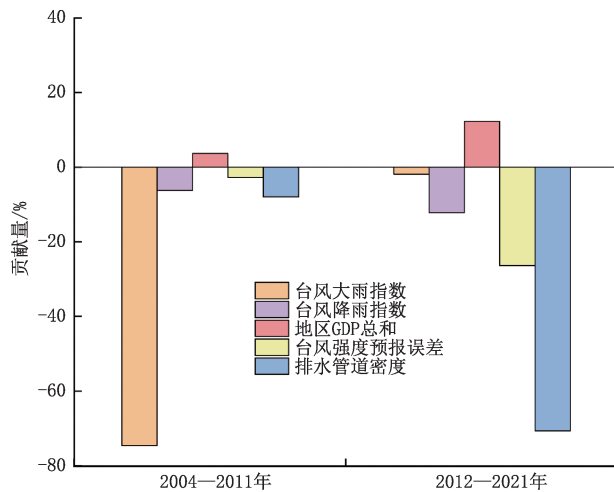


图 5 各影响因子对台风灾害定基直接经济损失相对变化的贡献量

Fig. 5 Contribution of each impact factor to the relative change of fixed base direct economic losses of typhoon disaster

3 讨论

本研究结果表明,台风灾害经济损失与台风强度预报误差存在极显著的正相关关系,台风强度预报误差降低的幅度越大,其对台风灾害经济减损的贡献就越大。由于台风强度预报误差在 2012 年之前基本没有变化,导致其对台风灾害经济损失的贡献量仅有 -2.8% ,而 2012—2021 年期间台风强度预报误差的下降明显提升了其对台风灾害经济损失的贡献程度,贡献量高达 -26.3% ,成为该时期影响台风灾害经济损失的主要贡献因子之一。中央气象台在 2012 年之后升级了台风预报技术并将其业务化运行^[33],与 2004—2011 年相比,2012—2021 年的台风强度预报误差整体上降低(图 3d),但是,台风预报技术的提升没有即时降低台风强度预报误差,台风强度预报误差在 2012—2016 年呈现增长趋势而后在再显著下降,这可能是该时期极端强度的台风出现频率相对较高导致,具体原因有待专项深入研究和剖析。

台风预报分为路径预报和强度预报,由于路径预报误差与台风灾害直接经济损失的相关性不显著,因此本研究只分析了台风强度预报误差对台风灾

害损失的影响。吴影等^[13]研究表明,相比于台风路径预报误差,2002—2013 年间我国登陆台风造成的直接经济损失与强度预报误差的相关关系更为显著。这可能是因为路径预报只是决定了台风的登陆地点和强影响区域,与强度预报这一因子相比,其对经济损失的影响面相对较小;同时,区域尺度的大小也可能导致路径预报误差与直接经济损失之间的相关分析结果。本研究的区域尺度仅到省份这一级,未来可以利用县域尺度的台风灾损资料研究更小区域尺度下台风预报误差对于台风灾损的影响,深入剖析台风路径误差水平对于区域灾损的具体影响。

此外,台风灾害经济损失不仅与台风的风雨强度有关,也与台风影响地区的经济发展程度、防灾减灾水平等密切相关^[1, 36]。本研究结果表明台风大风指数是 2004—2011 年期间对中国台风灾害经济损失贡献最大的影响因子,而其他影响因子的贡献相对较小(图 5),这主要是由于 2004—2011 年期间台风大风指数大幅度下降(图 3a),而其他因子的变化趋势相对较小导致。但在 2012 年之后,台风大风指数基本无明显增减趋势,对台风灾害经济损失的贡献量大幅减小;而其他影响因子的贡献量在 2012 年之后均明显增加,并且台风强度预报误差和排水管道密度成为 2012—2021 年期间台风灾害经济损失下降的主导影响因子(图 5)。这说明在 2012 年之后,随着中国经济发展的快速发展,台风灾害直接经济损失的暴露度不断增大,经济损失量体加大;但另一方面,我国对台风灾害方面的预报精度和防灾减灾能力也在逐步加强,这在一定程度上也显著降低了台风灾害损失程度。

4 结论

(1)2004—2021 年期间,中国台风灾害定基直接经济损失呈现逐年降低趋势,台风影响地区的 GDP 总和、排水管道密度呈现明显增加趋势。台风大风指数和降雨指数在 2012 年之前明显下降,但在 2012 年之后下降趋势变弱。台风强度预报误差在 2012 年之前无明显变化趋势,但在 2012 年之后明显降低。

(2)基于 2012 年前后两个研究时段内监测数据构建的台风灾害定基直接经济损失评估模型均通过了 F 检验($p < 0.01$),模型结果具备可信性,但两个研究时段内构建的台风灾害经济损失评估模型参数存在较大差异。

(3)不同研究时间段内台风灾害经济损失的主导影响因子不同。台风大风指数是 2004—2011 年期间台风灾害定基直接经济损失显著下降的主导影响因子,但其在 2012 年之后却成为贡献最小的因子;台风强度预报误差和排水管道密度是 2012—2021 年期间台风灾害经济损失下降的主导影响因子。

参考文献

- [1] Li Y, Zhao S, Zhao D, et al. Changes in tropical cyclone disasters over China during 2001-2020 [J]. *Earth and Space Science*, 2023, 10: e2022EA002795.
- [2] 赵宝庆, 车永刚, 孙光武. 45 年间影响中国东海附近海区热带气旋统计特征[J]. *气象科技*, 2009, 37(5): 556-559. Zhao B Q, Che Y G, Sun G W. Statistical analysis of tropical cyclones affecting East China Sea in recent 45 years [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2009, 37(05): 556-559.
- [3] 柳岳清, 周国华, 陈曙. 热带气旋灾害特征及风险评估[J]. *气象科技*, 2010, 38(4): 526-531. Liu Y Q, Zhou G H, Chen S. Characteristics and risk assessment of disasters induced by tropical cyclones [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2010, 38(4): 526-531.
- [4] 刘倩, 高路, 赵鹏, 等. 2000-2016 年中国热带气旋灾害时空特征研究[J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(5): 50-57. Liu Q, Gao L, Zhao P, et al. Study on the temporal-spatial characteristics of tropical cyclone disasters in China in 2000-2016 [J]. *China Flood & Drought Management (in Chinese)*, 2020, 30(5): 50-57.
- [5] IPCC. *Climate change 2021: The physical science basis* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [6] 罗小莉, 姚才, 谭金凯. 登陆华南台风的频数及强度变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(4): 58-67. Luo X L, Yao C, Tan J K. Analysis on numbers and intensity characteristics of typhoon landed in the South China [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 2018, 35(4): 58-67.
- [7] 任伟, 任燕, 张庆. 台风“温比亚”影响期间山东极端降水过程水汽来源及源区贡献定量分析[J]. *气象科技*, 2022, 50(1): 94-102. Ren W, Ren Y, Zhang Q. Moisture sources and quantitative analysis of source contributions of extreme precipitation in Shandong Province affected by Rumbia [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2022, 50(1): 94-102.
- [8] 朱男男, 左涛, 苏杭. 台风“摩羯”和“利奇马”经渤海强度变化特征分析[J]. *气象科技*, 2022, 50(2): 214-223. Zhu N N, Zuo T, Su H. Characteristic analysis of intensity variation of typhoon Yagi and Lekima above Bohai sea [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2022, 50(2): 214-223.
- [9] 周宇, 凌芬曼, 施晨晓. 近 60 年永兴岛热带气旋降水的气候特征分析[J]. *气象科技*, 2021, 49(1): 69-76. Zhou Y, Ling F M, Shi C X. Climatic features of rainfall induced by tropical cyclones in Yongxing Island in recent 60 years [J]. *Meteorological Science And Technology (in Chinese)*, 2021, 49(1): 69-76.
- [10] 郑丽娜, 王媛, 张子涵. 2019 年台风利奇马引发山东特大暴雨成因分析[J]. *气象科技*, 2021, 49(3): 437-445. Zheng L N, Wang Y, Zhang Z H. Causal analysis of extra torrential rain of typhoon Lekima in Shandong in 2019 [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 2021, 49(3): 437-445.
- [11] 李泽椿. 登陆我国台风影响评估模型[J]. *中国应急管理*, 2008, (8): 12-17. Li Z C. Prediction model of typhoon impact on landfall in China [J]. *China Emergency Management (in Chinese)*, 2008, (8): 12-17.
- [12] 钱燕珍, 何彩芬, 杨元琴, 等. 热带气旋灾害指数的估算与应用方法[J]. *气象*, 2001, (1): 14-18+24. Qian Y Z, He C F, Yang Y Q, et al. An assessment of damage index for tropical cyclones [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2001, (1): 14-18+24.
- [13] 吴影, 陈佩燕, 雷小途. 登陆热带气旋路径和强度预报的效益评估初步研究. *热带气象学报*, 2017, 33(5): 675-682. Wu Y, Chen P Y, Lei X T. A preliminary study on the benefit assessment of track and intensity forecast of landfall tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 2017, 33(5): 675-682.
- [14] 黄春枝, 郑书富. 福建省台风灾害风险模糊评估[J]. *绿色科技*, 2018, (20): 114-116+119. Huang C Z, Zheng S F. Fuzzy evaluation of typhoon disaster risk in Fujian [J]. *Journal of Green Science and Technology (in Chinese)*, 2018, (20): 114-116+119.
- [15] 张眉, 金有杰, 王倩. 基于模糊综合评价法的浙江省台风灾害农田损失评估分析[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(20): 5002-5006. Zhang M, Jin Y J, Wang Q. Loss assessment of farmland from typhoon disaster based on fuzzy comprehensive evaluation in Zhejiang Province [J]. *Hubei Agricultural Sciences (in Chinese)*, 2014, 53(20): 5002-5006.
- [16] 张永恒, 范广洲, 马清云, 等. 浙江省台风灾害影响评估模型[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 772-776. Zhang Y H, Fan G Z, Ma Q Y, et al. The evaluation model of typhoon disaster influence on Zhejiang Province [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 2009, 20(6): 772-776.
- [17] 王秀荣, 王维国, 马清云. 台风灾害综合等级评估模型及应用[J]. *气象*, 2010, 36(1): 66-71. Wang X R, Wang W G, Ma Q Y. Model for general grade division of typhoon disaster and application [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 2010, 36(1): 66-71.
- [18] 叶丁嘉, 王国复, 尹宜舟, 等. 基于灰色关联法的县域台风灾情评估方法初探[J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(1): 68-75. Ye D J, Wang G F, Yin Y Z, et al. Study on typhoon disaster assessment at county level based on grey relational analysis [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 2019, 39(1): 68-75.

- [19] 陈有利, 朱宪春, 胡波, 等. 基于BP神经网络的宁波市台风灾情预估模型研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(5): 668-675. Chen Y L, Zhu X C, Hu B, et al. Investigate on the pre-assessment of typhoon disaster in Ningbo based on BP neural network [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2018, 41(5): 668-675.
- [20] 李博, 冯俏彬, 戚克维. 基于改进的神经网络模型预测气象灾害经济损失—以广东省台风灾害为例[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(4): 247-253. Li B, Feng Q B, Qi K W. Economic loss prediction of meteorological disaster based on improved neural network model: taking the typhoon disaster in Guangdong as an example [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science) (in Chinese), 2021, 35(4): 247-253.
- [21] 周纳, 刘强. 基于模糊神经网络的广东省台风灾害损失预测. 海洋环境科学, 2022, 41(3): 461-466. Zhou N, Liu Q. Prediction of typhoon disaster losses in Guangdong province based on fuzzy neural networks [J]. Marine Environmental Science (in Chinese), 2022, 41(3): 461-466.
- [22] 徐庆娟, 潘金兰, 刘合香. 基于三维信息扩散和随机过程的台风灾害风险估计. 南宁师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 54-69. Xu Q J, Pan J L, Liu H X. Risk estimation of typhoon disaster based on three-dimensional information diffusion and stochastic process [J]. Journal of Nanning Normal University (Natural Science Edition) (in Chinese), 2020, 37(4): 54-69.
- [23] Chen P, Yu H, Xu M, et al. A simplified index to assess the combined impact of tropical cyclone precipitation and wind on China [J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 13(4): 672-681.
- [24] 陈佩燕, 杨玉华, 雷小途, 等. 我国台风灾害成因分析及灾情预估. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 64-73. Chen P Y, Yang Y H, Lei X T, et al. Cause analysis and preliminary hazard estimate of typhoon disaster in China [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 2009, 18(1): 64-73.
- [25] 刘方田, 许尔琪. 海南省台风特点与灾情评估时空关联分析[J]. 灾害学, 2020, 35(2): 217-223. Liu F T, Xu E Q. Spatio-temporal correlation analysis of typhoon characteristics and disaster assessment in Hainan Province [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 2020, 35(2): 217-223.
- [26] 刘扬, 张立生, 赵慧霞. 中国台风灾害损失与气象要素的关系分析[J]. 气象与环境科学, 2023, 46(4): 1-6. Liu Y, Zhang L S, Zhao H X. Analysis on the relationship between typhoon disaster and meteorological parameters in China [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 2023, 46(4): 1-6.
- [27] 牛海燕, 刘敏, 陆敏, 等. 中国沿海地区台风灾害损失评估研究[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 61-64. Niu H Y, Liu M, Lu M, et al. Losses assessment of typhoon disaster in China coastal areas [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 2011, 26(3): 61-64.
- [28] 韩鹏, 郭桂祯, 孙宁, 等. 广东省台风灾害时空格局及影响因素研究[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 112-117. Han P, Guo G Z, Sun N, et al. Spatiotemporal patterns and influencing factors of typhoon disaster in Guangdong Province China [J]. Journal of Catastrophology (in Chinese), 2022, 37(3): 112-117.
- [29] 林沛延, 林陪晖, 王俊, 等. 基于机器学习方法的浙江省台风灾害风险评估和动态风险预报[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(4): 13-24. Lin P Y, Lin P H, Wang J, et al. Typhoon disaster risk assessment and dynamic risk forecast in Zhejiang Province based on machine learning method [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 2023, 32(4): 13-24.
- [30] 张永恒, 张建忠, 温显罡, 等. 台风灾害主要承灾体易损性研究——以浙江为例[J]. 气象科技, 2016, 44(1): 157-163. Zhang Y H, Zhang J Z, Wen X G, et al. Vulnerability of hazard bearing bodies of typhoon disaster: a case study in Zhejiang [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2016, 44(1): 157-163.
- [31] 施素芬, 赵利刚. 强台风“云娜”灾害特征及其评估[J]. 气象科技, 2006, 34(3): 315-318. Shi S F, Zhao L G. Characteristics of Severe Typhoon Ranim and its assessment [J]. Meteorological Science And Technology (in Chinese), 2006, 34(3): 315-318.
- [32] Yu H, Chen G, Zhou C, et al. Are we reaching the limit of tropical cyclone track predictability in the Western North Pacific? [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2022, 103(2): 410-428.
- [33] 王靖, 许映龙, 董林, 等. 2012-2021年中央气象台台风3~5d路径预报误差分析[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 25-33. Wang J, Xu Y L, Dong L, et al. Analysis of typhoon track forecast errors for 3~5 days by Central Meteorological Observatory from 2012 to 2021 [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 2022, 39(6): 25-33.
- [34] 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 875-883. Lei X T, Chen P Y, Yang Y H, et al. 2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(5): 875-883.
- [35] 尹朝静, 李谷成, 高雪. 气候变化对中国粮食产量的影响—基于省级面板数据的实证[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 89-94. Yin Z J, Li G C, Gao X. Impacts of climate change on China's grain production—empirical analysis based on provincial panel data [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 2016, 30(6): 89-94.
- [36] 李钢, 邱新法, 张眉, 等. 浙江省台风灾害直接经济损失评估模型[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 178-183. Li G, Qiu X F, Zhang M, et al. Direct economic losses assessment of typhoon disaster in Zhejiang Province [J]. Tropical Geography (in Chinese), 2014, 34(2): 178-183.

Identification of Dominant Impact Factors of Typhoon Disaster Economic Losses in China

XU Jinqin¹ SHEN Danna² WANG Qian³ MENG Mingming⁴

(1 Guangdong Meteorological Service Center, Guangzhou 510640; 2 CMA Institute for Development and Programme Design, Beijing 100081; 3 National Meteorological Center, Beijing 100081; 4 School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Based on comprehensive data spanning from 2004 to 2021, encompassing 125 typhoon disaster events within China, and in conjunction with wind and rain observation data collected from ground meteorological stations as well as synchronous social and economic statistical data, this study develops a robust model for assessing the direct economic losses of typhoon disasters. This model takes into account causative factors, receptor characteristics, and disaster prevention and reduction capacity. On the basis of this model, we design a quantitative analysis method to conduct an in-depth exploration and quantitative analysis of the dominant factors influencing the change in direct economic losses caused by typhoon disasters in China. The research findings indicate that during the observation period from 2004 to 2021, overall direct economic losses resulting from typhoon disasters in China exhibit a significant year-on-year decreasing trend. Simultaneously, there are discernible signs of weakening in the wind and rain intensity associated with these typhoons in China. Taking 2012 as the cut-off point (the year when real-time correction technology for ensemble forecast of typhoon paths is officially put into use), our study finds that prior to this year, the typhoon wind index is identified as the most significant factor contributing to economic losses from these disasters during the observation period from 2004 to 2021; however, its influence decreases significantly after 2012, becoming the smallest contributing factor to the direct economic losses of typhoon disasters during the observation period from 2012 to 2021. Compared with the observation period from 2004 to 2011, there is a notable increase in contributions to the direct economic losses of typhoon disasters in China from factors related to typhoons after 2012, such as the typhoon rain index, regional GDP, typhoon intensity forecast error, and drainage pipe density factor. Particularly noteworthy is our identification of improved accuracy in forecasting typhoon intensity along with substantial increases during the observation period from 2012 to 2021 regarding drainage pipe density being the dominant impact factor driving down direct economic losses resulting from typhoon-related disasters. This study not only reveals differences over different research periods regarding dominant influencing factors on direct economic losses caused by Chinese typhoon disasters but also emphasises strengthening development and application of technologies for forecasting typhoons alongside improving infrastructure like drainage systems can effectively reduce their impact on society's economy. These findings provide crucial references for formulating more scientific and efficient strategies aimed at addressing typhoon-related disasters.

Keywords: typhoon disaster; direct economic loss; assessment model; dominant impact factor

Received: 2023-11-1 Accepted: 2024-8-14

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)