

伍红雨,邹燕,郭尧,2023. 损失率评估模型在广东气象灾害损失评估中的应用[J]. 气象,49(6):757-764. Wu H Y,Zou Y,Guo Y,2023. Application of loss rate evaluation model in meteorological disaster loss evaluation in Guangdong[J]. Meteor Mon,49(6):757-764(in Chinese).

损失率评估模型在广东气象灾害损失评估中的应用*

伍红雨^{1,2} 邹 燕³ 郭 尧⁴

1 广东省气候中心,广州 510641

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室,广州 510641

3 福建省气候中心,福州 350001

4 南方电网数字电网集团有限责任公司,广州 510663

提 要: 利用 1995—2021 年《广东省防灾减灾年鉴》《2021 广东统计年鉴》资料,基于面向气象灾害损失的损失率评估模型,对近 27 年广东暴雨洪涝、台风、低温冷冻、干旱、强对流(含雷击)等 5 种主要气象灾害逐年损失和总损失进行定量评估和分析。结果表明,台风、暴雨、低温冷冻、强对流以及总损失的年损失率指数最大峰值都出现在 20 世纪 90 年代中后期,干旱年损失率指数峰值出现在 2002 年。广东气象灾害总损失极重有 6 年,其中 1994 年损失率指数达 7.62,为研究时段内气象灾害总损失最重的年份。近 27 年来,广东年气象灾害总损失的损失率指数呈明显减小的趋势,2000—2020 年期间指数平均值为 0.17,较 1994—1999 年平均值减小 92.54%,死亡失踪人数指数减少 60.83%。

关键词: 损失率评估模型,气象灾害损失,评估,广东

中图分类号: P429,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.052202

Application of Loss Rate Evaluation Model in Meteorological Disaster Loss Evaluation in Guangdong

WU Hongyu^{1,2} ZOU Yan³ GUO Yao⁴

1 Guangdong Climate Centre, Guangzhou 510641

2 Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA/Guangdong Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510641

3 Fujian Climate Centre, Fuzhou 350001

4 China Southern Power Grid Digital Grid Group Co., Ltd., Guangzhou 510663

Abstract: Using the data of the 1995—2021 *Guangdong Disaster Prevention and Reduction Yearbook and the 2021 Guangdong Statistical Yearbook*, based on the loss rate assessment model for meteorological disaster losses, we quantitatively analyze and assess the annual losses and total losses of five major meteorological disasters caused by rainstorm, flood, typhoon, low temperature freezing, drought and severe convection (including lightning strike) in Guangdong in the past 27 years. The results show that the peak values of annual loss rate indexes of typhoon, rainstorm, low temperature freezing, severe convection and total loss all appeared in the middle and late 1990s, while the peak value of drought loss rate index was seen in 2002. The total losses of meteorological disasters in Guangdong were extremely heavy in 6 years, of which the loss rate index in 1994 reached 7.62, so 1994 is the year with the highest total loss of meteorological

* 2022 年度广东省级灾害防治及应急管理专项项目——2022 年应急风险分析与应急能力建设研究、广东省气象局科技创新团队(GRM-CTD202101)和国家自然科学基金项目(41930972)共同资助

2022 年 5 月 5 日收稿; 2023 年 5 月 22 日收修定稿

第一作者:伍红雨,主要从事气候特征变化和机理研究. E-mail:492019784@qq.com

disasters during the research periods. In the past 27 years, the loss rate index of the total losses caused by meteorological disasters in Guangdong has shown a significant decreasing trend. The average index value during the period from 2000 to 2020 was 0.17, a decrease of 92.54% compared to the average value from 1994 to 1999, and a decrease of 60.83% in the index of deaths and missing persons.

Key words: loss rate evaluation model, meteorological disaster loss, evaluation, Guangdong Province

引 言

广东地处低纬,属于亚热带、热带季风气候区。由于北面大陆,南临南海,还拥有我国最长的海岸线,导致台风、暴雨、低温、干旱、高温、强对流等气象灾害频发,损失严重。据统计,1994—2020年广东平均每年因气象灾害造成死亡失踪140人,直接经济损失达163.02亿元,占广东地区生产总值(GDP)的0.86%(《广东省防灾减灾年鉴》编纂委员会,1995—2021)。其中,1994年气象灾害造成死亡失踪353人,直接经济损失达261.46亿元,占当年GDP的5.66%,灾害损失异常严重。联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告(IPCC,2022)指出,人类活动增加了极端高温、降水、干旱和热带气旋发生可能性和强度,全球持续变暖下,极端事件更加频繁更为严重。因此充分认识评估气象灾害损失,特别是极端事件的损失是当前防灾减灾的迫切需求(李宁等,2017;徐璨,2018)。

气象学者针对各类气象灾害损失进行分析评估取得了有意义的成果。李茂松等(2003)分析了中国1950—2000年干旱受灾面积和成灾面积的变化特征。孙家民和黄朝迎(2005)采用回归方法建立干旱、洪涝受(成)灾面积与逐旬降水量距平的模型对中国农业气候年景进行评估。徐良炎和高歌(2005)采用台风灾害损失率来评估台风灾害年景。Zhao et al(2014)基于灰色关联理论对2004—2009年中国大陆暴雨洪涝灾害损失进行综合风险评估。赵珊珊等(2015)采用农作物受灾面积,去掉通胀率的直接经济损失等分析TC灾害的时空分布特征。尹宜舟和李焕连(2017)、王秀荣等(2018)、高歌等(2019)、Wang et al(2019)、刘扬和王维国(2020)、张强等(2020;2021)对台风、暴雨、干旱等灾害进行评估。这些研究推动了气象灾害损失评估技术的发展,但由于建模方法、分灾种损失规模及指标的不一致,导致难以形成统一适用于不同气象灾害损失的评估模型,同时考虑各灾害的综合评估模型还存在

指标权重系数确定具有一定的主观性因素(尹宜舟等,2019;2021)。

尹宜舟等(2019;2021)在灾度概念(徐敬海等,2012;高建国,2018)的基础上提出了气象灾害的损失评估模型,该评估模型由农作物受灾面积、受灾人数、直接经济损失、死亡失踪人口四维构成,在模型计算过程中避免使用权重系数,由灾度平面与死亡失踪人数的灾体体积来定量描述灾害损失,且突出了死亡失踪人数的重要性。利用此评估模型,尹宜舟等(2019;2021)对我国、朱志存等(2020)对浙江的气象灾害损失年景进行评估,得出此模型评估结果科学客观,也利于气象灾害在分灾种、总损失的评估方法统一。伍红雨等(2019;2020)利用气温、降水等基本气象要素对广东气候年景开展客观定量评估。但是对广东各类气象灾害损失及总损失的年定量评估还未开展。因此本文利用面向气象灾害损失的损失率评估模型对广东台风、暴雨洪涝、低温冷害、干旱、强对流这5种气象灾害损失以及总损失进行分析评估,研究结果为广东气象灾害损失的客观定量评估以及防灾减灾、决策服务提供技术支撑。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文所用的暴雨洪涝、台风、低温冷冻、干旱、强对流(含雷击)这5种主要气象灾害的受灾人口、农业受灾面积、直接经济损失、死亡失踪人数的逐年损失资料来自1995—2021年逐年的《广东省防灾减灾年鉴》(《广东省防灾减灾年鉴》编纂委员会,1995—2021)中记录的相应上一年情况;年末总人口、广东地区生产总值(GDP)资料来自《2021年广东统计年鉴》(广东省统计局,2021);灾情资料还来自《中国气象灾害大卷:广东卷》(《中国气象灾害大典》编委会,2006)以及2003—2020年的《广东省气候公报》(广东省气候中心,2004—2021)等。

1.2 气象灾害损失评估的损失率评估模型计算方法

对气象灾害损失评估模型的建立、相对灾体量指数计算方法和计算公式参考尹宜舟等(2019; 2021)的文章。采用的气象灾害损失评估模型由受灾人数、受灾面积、直接经济损失和死亡失踪人数构成,如图 1 所示,图上的虚线三角形为灾度平面,代表损失的基本规模,其垂直方向为死亡失踪人数,灾度平面与死亡失踪人数构成的三角体称为灾体。通过规范化处理的各要素的值计算灾体“体积”,得到灾体量指数,即损失率指数。损失率指数(D^*)考虑了当年社会经济发展情况,这样更加合理,也方便年际间的比较,其计算步骤如下。

(1)灾损率计算

灾损率分别为广东年受灾人数(万人)、年农作物受灾面积(10^4 ha)、年直接经济损失(亿元)分别与当年的广东年末总人口(万人)、年农作物播种面积(10^4 ha)、国内生产总值(GDP)的比值。

(2)确定基本值

对受灾人数、农作物受灾面积、直接经济损失、死亡失踪人数等灾情指标首先进行规范化处理,以便不同灾情指标之间进行计算。一般规范化处理是

采用样本指标与样本序列最大值的比值进行处理。但由于序列值最大值与最小值相差巨大,本文基本值定义为无极端样本的序列平均值与 1 倍标准差之和,基本值的计算步骤详见尹宜舟等(2021)。

(3)序列规范化

采用 $I_x = X/Y$ 对各损失要素进行规范化处理。式中: I_x 为规范化处理后的值, X 为各灾害要素的灾损率, Y 为基本值,极端样本相同处理。

(4)计算灾度平面面积 S

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} \quad (1)$$

$$p = 1/2(a+b+c) \quad (2)$$

式中: p 为灾度平面周长的一半, a 、 b 、 c 为三个边长,分别为受灾人数、受灾面积、直接经济损失的灾损率规范化处理后的值再利用勾股定理计算得到。

(5)计算损失率指数(D^*)

$$D^* = SI_m$$

式中: D^* 为损失率指数, S 为灾度平面面积, I_m 为规范化的死亡失踪人数,当死亡失踪为 0 人时,均以 1 人代替。 D^* 越大,代表灾害损失越重。

(6)损失率指数分级方法

计算得到 1994—2020 年广东台风、暴雨洪涝、低温冰冻、干旱、强对流以及年总损失(以上 5 种灾害各要素损失之和)的损失率指数 D^* 共 6 个序列,按照百分位法(表 1)对序列按每 20% 划分为 5 个等级,将 5 种灾害以及总损失对应的年份划分为极重(5 级)、重(4 级)、偏重(3 级)、偏轻(2 级)、轻(1 级)共 5 个等级。

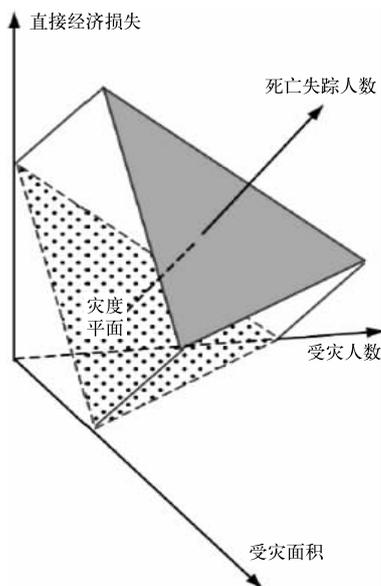


图 1 气象灾害损失率评估模型示意图
(引自尹宜舟等,2021)

Fig. 1 Schematic diagram of disaster body model for meteorological disaster loss evaluation
(cited from Yin et al, 2021)

表 1 气象灾害损失评估的不同百分位(P)划分标准
Table 1 Different percentile (P) division standard for annual evaluation of meteorological disaster loss

评估等级	百分位
极重(5级)	$P > 80\%$
重(4级)	$60\% < P \leq 80\%$
偏重(3级)	$40\% < P \leq 60\%$
偏轻(2级)	$20\% < P \leq 40\%$
轻(1级)	$P \leq 20\%$

2 广东主要气象灾害损失评估

下面以台风为例,对台风灾害的年灾损率,包括受灾人数、农作物受灾面积、年直接经济损失、死亡和失踪人数这 4 个指标进行规范化处理,按 1.2 节的计算方法,计算灾度面积 S 以及损失率指数 D^* ,并采用百分位法进行分级,结果见表 2。从台风的

灾度面积比较,1994、1995、1996、1997、2005 年排在前 5 位;从死亡失踪人数比较,1995、1996、1997、2006、2010 年排在前 5 位;从损失率指数 D^* 比较,1994、1995、1996、1997、2003、2006 年排在前 6 位。按分级标准,台风灾害损失有 6 年为极重:1994、1995、1996、1997、2003、2006 年;有 5 年为重:2001、2008、2010、2013、2015 年;有 5 年为偏重:1999、

2000、2002、2009、2018 年;其余 11 年为偏轻到轻。1994—1997 年以及 2003、2006 年台风灾害损失极重,这与台风死亡失踪人数多、经济损失大、受灾人数和受灾面积大有关。2011—2020 年,除 2013、2015、2018 年为偏重、重外,其余 7 年为偏轻到轻,没有极重,这与台风导致的死亡失踪人数大幅减少有关。

表 2 1994—2020 年广东台风损失率指数及评价

Table 2 The loss rate indexes and evaluation of Guangdong typhoon from 1994 to 2020

年份	受灾人口	农作物受灾面积	直接经济损失	灾度面积	死亡和失踪人数	损失率指数 D^*	评价
1994	1.573	1.080	4.371	4.255	1.197	5.095	极重
1995	0.816	0.524	2.485	1.223	1.662	3.933	极重
1996	2.326	1.171	1.486	2.366	3.634	4.447	极重
1997	1.119	0.540	0.701	0.531	1.310	0.695	极重
1998	0.150	0.151	0.031	0.012	0.014	0.000	轻
1999	0.392	0.163	0.170	0.048	0.310	0.042	偏重
2000	0.237	0.323	0.108	0.044	0.578	0.028	偏重
2001	0.006	0.009	0.003	0.000	0.465	0.226	重
2002	0.470	0.298	0.125	0.078	0.493	0.039	偏重
2003	1.233	0.655	0.323	0.462	0.733	0.339	极重
2004	0.768	0.779	0.376	0.363	0.056	0.000	轻
2005	1.467	1.058	0.987	1.183	0.014	0.000	轻
2006	0.230	0.091	0.066	0.013	2.522	2.983	极重
2007	0.145	0.194	0.070	0.016	0.014	0.000	轻
2008	0.584	0.323	0.293	0.136	0.859	0.312	重
2009	0.906	0.877	0.418	0.477	0.366	0.016	偏重
2010	0.075	0.136	0.068	0.007	1.958	0.121	重
2011	0.129	0.223	0.290	0.040	0.014	0.000	轻
2012	0.169	0.484	0.067	0.044	0.127	0.002	偏轻
2013	0.976	0.713	0.559	0.485	0.620	0.295	重
2014	0.265	0.348	0.188	0.062	0.014	0.003	偏轻
2015	0.078	0.154	0.031	0.007	0.225	0.048	重
2016	0.334	0.748	0.308	0.178	0.014	0.001	偏轻
2017	0.254	0.588	0.190	0.096	0.183	0.007	偏轻
2018	0.410	0.756	0.332	0.211	0.254	0.025	偏重
2019	0.011	0.066	0.002	0.000	0.014	0.000	轻
2020	0.003	0.014	0.003	0.000	0.014	0.000	轻

图 2 为 1994—2020 年广东各类气象灾害损失和总损失的损失率指数历年变化、线性趋势以及评估等级。可见,台风灾害在 1994—1997 连续 4 年以及 2003、2006 年均为极重。暴雨洪涝则在 1994、1997、1998、2005、2008、2013 年为极重,特别是 1994 年损失率指数高达 419.9,是位列第二的 1997 年指数(14.9)的 28 倍。低温冰冻灾害在 1996、1999、2002、2004、2008、2016 年为极重,特别是 1999、2008 年损失指数很大。干旱灾害在 1994、1995、1998、1999、2002、2004 年为极重。强对流(含雷电)在

1995、1996、2002、2003、2004、2005 年为极重。包括 5 类气象灾害的总损失评估,在 1994、1995、1996、1997、2006、2008 年为极重,其中 1994 年最重,损失率指数达 7.62,是第二位(1996 年:2.57)损失率指数的 3 倍。

近 27 年各类气象灾害损失及总损失的损失率指数线性变化趋势均为下降趋势(图 2),其中除低温冰冻灾害指数未通过 0.05 显著性水平检验,下降不明显外,其余灾害和总损失都通过 0.05 显著性水平检验,下降趋势明显,特别是 2009 年后呈显著减

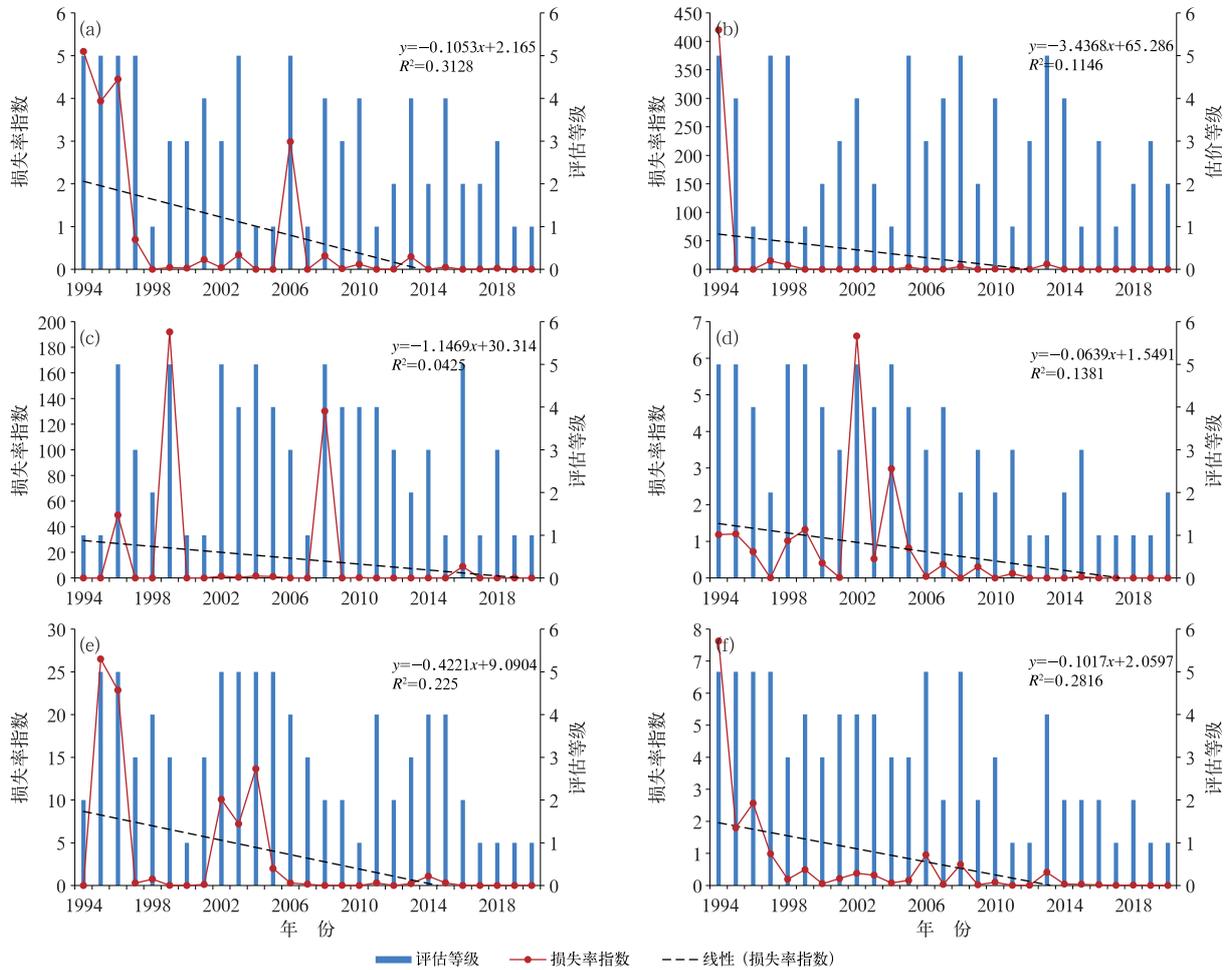


图 2 1994—2020 年广东气象灾害损失率指数、线性趋势和评估等级历年变化

(a) 台风, (b) 暴雨洪涝, (c) 低温冷害, (d) 干旱, (e) 强对流, (f) 总损失

Fig. 2 Changes of relative loss ratio index of total meteorological disaster losses,

linear trend and evaluating grade in Guangdong from 1994 to 2020

(a) typhoon, (b) rainstorm and flood, (c) cold damage,

(d) drought, (e) severe convection, (f) total disaster

轻趋势。图 2 可见,台风、暴雨、低温冷冻、强对流以及总损失的损失率指数最大峰值都出现在 20 世纪 90 年代中后期,干旱峰值出现在 2002 年。从以上主要气象灾害损失和总损失的逐年评估看,极重、重年份主要出现在 1994—1999 年,而 2000—2020 年以偏重、偏轻、轻为主。广东各类气象灾害损失以及总损失在灾度面积、死亡失踪人数、损失率指数在 2000 年后比之前明显减小(表 3),气象灾害总损失的损失率指数在 2000—2020 年的平均值为 0.17,较 1994—1999 年平均值 2.27 减小 92.54%,死亡失踪人数指数减少 60.83%。可见广东气象灾害总损失在 2000 年后明显减少。这与姜灵峰(2018)分

析指出我国洪涝灾害损失各指标在 21 世纪以来均呈较大下降幅度,王毅等(2021)指出中国洪涝灾害

表 3 广东气象灾害损失率指数 2000—2020 年平均值与 1994—1999 年平均值比较(单位:%)
Table 3 Comparison of average values of relative loss ratio indexes in Guangdong between 2000—2020 and 1994—1999 (unit: %)

灾害	灾度面积 减小	死亡失踪人 数减少	损失率指数 减小
台风	-87.32	-66.53	-91.14
暴雨洪涝	-94.41	-68.90	-98.69
低温冷冻	-82.92	-	-82.92
干旱	-36.26	-	-36.26
强对流	-82.70	-43.53	-79.88
总损失	-85.76	-60.83	-92.54

导致的年死亡人数在 1999 年前后出现多到少的明显转折相一致。

从上评估得到,1994、1995、1996、1997、2006、2008 年这 6 年广东气象灾害总损失为极重。表 4 为这 6 年广东的气象灾害损失情况,可见广东气象灾害总损失极重年与强台风、极端暴雨洪涝、强寒潮、强对流天气等重大气象灾害密切相连。2008 年

受异常大气环流和拉尼娜事件等影响,全球气候极端异常(徐雨晴等,2009;张培群等,2009),广东台风、暴雨、低温冰冻、强对流灾害损失异常严重。2008 年广东最强“龙舟水”、2008 年南方雨雪冰冻灾害、0814 号强台风黑格比等共造成 2008 年广东死亡失踪 125 人,直接经济损失达 421.70 亿元。

把计算得到的 1994—2020 年气象灾害总损失

表 4 1994—2020 年广东气象灾害年总损失评估为极重的 6 年灾害情况

Table 4 The 6-year disaster situation with extremely heavy levels of annual evaluation of the total loss of meteorological disasters in Guangdong from 1994 to 2020

年份	受灾人口/万人	农业受灾面积/10 ⁴ ha	死亡失踪人数/人	直接经济损失/亿元	损失率指数	重大气象灾害
1994	3588.16	191.22	353	261.46	7.62	1994 年 6—7 月西江、北江均发生特大洪水,9403 号强热带风暴肆虐雷州半岛
1995	3815.58	205.15	199	120.48	1.80	9505 号台风,9509 号台风,“4·19”龙卷型强风暴
1996	1596.92	141.84	335	253.53	2.57	9610 号台风,9615 号超强台风莎莉,4 月 18—20 日强对流,2 月强寒潮
1997	2032.96	92.42	373	100.48	0.99	1997 年 5—6 月罕见暴雨洪水,9710 号台风,9713 号台风,龙卷风、雷电等异常重
2006	2477.83	120.92	286	310.62	0.95	2006 年 5—6 月大暴雨,0604 号“碧利斯”等 7 个台风登陆或严重影响,强对流天气重
2008	3314.21	184.57	125	421.70	0.65	2008 年南方雨雪冰冻灾害,广东最强“龙舟水”,0814 号强台风黑格比等,强对流异常重

的损失率指数与未经过规范化处理的各类灾害直接经济损失与 GDP 的比率序列进行相关计算,损失率指数与台风的相关系数是 0.97,与暴雨洪涝的相关系数是 0.91,与干旱的相关系数是 0.47,都通过了 0.05 显著性水平检验,相关显著;其中,台风、暴雨还通过了 0.001 显著性水平检验;说明损失率评估模型能综合体现台风、暴雨是造成广东直接经济损失的最主要因子的特征,评估模型客观合理。

3 结 论

利用 1995—2021 年《广东省防灾减灾年鉴》5 种主要气象灾害各指标逐年损失数据,以及《2021 年广东统计年鉴》人口和地区生产总值(GDP)数据,基于面向气象灾害的损失率评估模型,对 1994—2020 年广东每年的主要气象灾害分灾种损失和总损失进行定量评估,得到下述主要结论。

(1)1994—2020 年广东台风、暴雨、低温冷冻、强对流以及总损失的年损失率指数最大峰值都出现在 20 世纪 90 年代中后期(1994—1999 年),干旱年

损失率指数峰值出现在 2002 年。

(2)在 1994—2020 年,包括广东台风、暴雨洪涝、低温冷冻、干旱、强对流这 5 类气象灾害总损失的极重年有 6 年,分别为 1994、1995、1996、1997、2006、2008 年,其中 1994 年损失率指数达 7.62,为研究时段气象灾害总损失最重的年份。气象灾害损失极重年与强台风、极端暴雨洪涝、2008 年最强“龙舟水”、2008 年雨雪冰冻、极端强对流天气等重大气象灾害密切相连。

(3)近 27 年来,广东年气象灾害总损失的年损失率指数呈明显减小的趋势,2000—2020 年指数平均值为 0.17,较 1994—1999 年平均值减小了 92.54%,死亡失踪人数指数减少了 60.83%,气象灾害总损失在 2000 年后明显减少。

参考文献

- 高建国,2018. 灾害对社会影响和损失大小的一个可量化值:灾度[J]. 中国人口·资源与环境,18(专刊):588-590. Gao J G, 2018. A quantifiable value of the impact and loss of disasters on society: disaster degree[J]. China Population, Res and Envir, 18 (S):588-590(in Chinese).

- 高歌,黄大鹏,赵珊珊,2019. 基于信息扩散方法的中国台风灾害年月尺度风险评估[J]. 气象,45(11):1600-1610. Gao G, Huang D P, Zhao S S, 2019. Annual and monthly risk assessment of typhoon disasters in China based on the information diffusion method[J]. Meteor Mon, 45(11):1600-1610(in Chinese).
- 《广东省防灾减灾年鉴》编纂委员会,1995—2021. 广东省防灾减灾年鉴(1995—2021年卷)[M]. 广州:岭南美术出版社. Compilation Committee of Guangdong Province Disaster Prevention and Reduction Yearbook, 1995—2021. Guangdong Province Disaster Prevention and Reduction Yearbook (Volume 1995—2021) [M]. Guangzhou: Lingnan Art Publishing House(in Chinese).
- 广东省统计局,2021. 2021年广东统计年鉴[EB/OL]. Statistics Bureau of Guangdong Province, 2021. Guangdong statistical yearbook on 2021[EB/OL]. http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_3557537.html(in Chinese).
- 广东省气候中心,2004—2021. 广东省气候公报(2003—2020)[R]. Climate Center of Guangdong Province, 2004—2021. Guangdong Province Climate Bulletin(2003—2020)[R](in Chinese).
- 姜灵峰,2018. 近76年我国洪涝灾损度变化特征分析[J]. 气象科技进展,8(5):11-16. Jiang L F, 2018. Analysis on the characteristics of flood disaster damage in China in recent 76 years[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(5):11-16(in Chinese).
- 李茂松,李森,李育慧,2003. 中国近50年旱灾灾情分析[J]. 中国农业气象,24(1):7-10. Li M S, Li S, Li Y H, 2003. Studies on drought in the past 50 years in China[J]. Chin J Agrometeorol, 24(1):7-10(in Chinese).
- 李宁,张正涛,陈曦,等,2017. 论自然灾害经济损失评估研究的重要性[J]. 地理科学进展,36(2):256-263. Li N, Zhang Z T, Chen X, et al, 2017. Importance of economic loss evaluation in natural hazard and disaster research[J]. Progr Geogr, 36(2):256-263(in Chinese).
- 刘扬,王维国,2020. 基于随机森林的暴雨灾害人口损失预估模型及应用[J]. 气象,46(3):393-402. Liu Y, Wang W G, 2020. Assessing model of casualty loss in rainstorms based on random forest and its application[J]. Meteor Mon, 46(3):393-402(in Chinese).
- 孙家民,黄朝迎,2005. 中国农业气候年景的评估及预测[J]. 应用气象学报,16(增刊):111-115. Sun J M, Huang C Y, 2005. Assessment and prediction for annual agricultural climate status in China[J]. J Appl Meteor Sci, 16(S):111-115(in Chinese).
- 王秀荣,张立生,李维邦,2018. 台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J]. 气象,44(2):304-312. Wang X R, Zhang L S, Li W B, 2018. Improvement and application analysis of the comprehensive grade evaluation model of typhoon disaster[J]. Meteor Mon, 44(2):304-312(in Chinese).
- 王毅,张晓美,周宁芳,等,2021. 1990—2019年全球气象水文灾害演变特征[J]. 大气科学学报,44(4):496-506. Wang Y, Zhang X M, Zhou N F, et al, 2021. Evolution characteristics of global meteorological and hydrological disasters from 1990 to 2019[J]. Trans Atmos Sci, 44(4):496-506(in Chinese).
- 伍红雨,邹燕,刘尉,2019. 广东区域性暴雨过程的定量化评估及气候特征[J]. 应用气象学报,30(2):233-244. Wu H Y, Zou Y, Liu W, 2019. Quantitative assessment of regional heavy rainfall process in Guangdong and its climatological characteristics[J]. J Appl Meteor Sci, 30(2):233-244(in Chinese).
- 伍红雨,邹燕,郭尧,2020. 广东气候年景的客观定量化评估[J]. 大气科学学报,43(3):516-524. Wu H Y, Zou Y, Guo Y, 2020. Objective assessment of annual climate status in Guangdong[J]. Trans Atmos Sci, 43(3):516-524(in Chinese).
- 徐璨,2018. 改革·创新·治理——重要事件勾勒我国防灾减灾救灾十年发展路[J]. 中国减灾, (9):8-11. Xu C, 2018. Reform, innovation and governance—important events outline the ten-year development path of disaster prevention, reduction and relief in China[J]. Disaster Reduction in China, (9):8-11(in Chinese).
- 徐敬海,聂高众,李志强,等,2012. 基于灾度的亚洲巨灾划分标准研究[J]. 自然灾害学报,21(3):64-69. Xu J H, Nie G Z, Li Z Q, et al, 2012. Disaster magnitude based Asian catastrophe criterion for classification [J]. J Nat Disasters, 21(3):64-69(in Chinese).
- 徐良炎,高歌,2005. 近50年台风变化特征及灾害年景评估[J]. 气象,31(3):41-45. Xu L Y, Gao G, 2005. Features of typhoon in recent 50 years and annual disaster assessment[J]. Meteor Mon, 31(3):41-45(in Chinese).
- 徐雨晴,苗秋菊,沈永平,2009. 2008年:气候持续变暖,极端事件频发[J]. 气候变化研究进展,5(1):56-60. Xu Y Q, Miao Q J, Shen Y P, 2009. The year 2008: global warming continued, extreme events occurred frequently[J]. Adv Climate Change Res, 5(1):56-60(in Chinese).
- 尹宜舟,高歌,王国复,2019. 气象灾害的灾体模型及其初步应用[J]. 气象,45(10):1439-1445. Yin Y Z, Gao G, Wang G F, 2019. Meteorological disaster volume model and its preliminary application[J]. Meteor Mon, 45(10):1439-1445(in Chinese).
- 尹宜舟,高歌,王国复,2021. 灾体模型的拓展及其在主要气象灾害损失年景评价中的应用[J]. 灾害学,36(2):19-23, 29. Yin Y Z, Gao G, Wang G F, 2021. Expansion of disaster volume model and its application in annual evaluation of major meteorological disasters losses[J]. J Catastrophol, 36(2):19-23, 29(in Chinese).
- 尹宜舟,李焕连,2017. 我国台风灾害年景预评估方法初探[J]. 气象,43(6):716-723. Ying Y Z, Li H L, 2017. Preliminary study on pre-evaluation method of typhoon disaster in China[J]. Meteor Mon, 43(6):716-723(in Chinese).
- 张培群,贾小龙,王永光,2009. 2008年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响[J]. 气象,35(4):112-116. Zhang P Q, Jia X L, Wang Y G, 2009. Anomalies of ocean and general atmospheric circulation in 2008 and their impacts on climate anomalies in China[J]. Meteor Mon, 35(4):112-116(in Chinese).
- 张强,谢五三,陈鲜艳,等,2021. 1961—2019年长江中下游区域性干

- 旱过程及其变化[J]. 气象学报, 79(4): 570-581. Zhang Q, Xie W S, Chen X Y, et al, 2021. Regional drought process and its variation characteristics in the middle-lower reaches of the Yangtze River from 1961 to 2019[J]. Acta Meteor Sinica, 79(4): 570-581 (in Chinese).
- 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等, 2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报, 78(3): 500-521. Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al, 2020. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China[J]. Acta Meteor Sinica, 78(3): 500-521 (in Chinese).
- 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 S S, Ren F M, Gao G, et al, 2015. Characteristics of Chinese tropical cyclone disaster in the past 10 years[J]. J Trop Meteor, 31(3): 424-432 (in Chinese).
- 《中国气象灾害大典》编委会, 2006. 中国气象灾害大典: 广东卷[M]. 北京: 气象出版社. Editorial Committee of China Meteorological Disaster Dictionary, 2006. China Meteorological Disaster Dictionary: Guangdong Volume[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 朱志存, 陈雄飞, 王永峰, 等, 2020. 基于四维灾体模型的浙江省气象灾害损失年景评价[J]. 海洋气象学报, 40(3): 121-125. Zhu Z C, Chen X F, Wang Y F, et al, 2020. Assessment of annual meteorological disaster loss situation in Zhejiang based on a four-dimensional disaster volume model[J]. J Mar Meteor, 40(3): 121-125 (in Chinese).
- IPCC, 2022. Summary for Policymakers[M]//Pörtner H O, Roberts D C, Poloczanska E S, et al. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 3-33.
- Wang H, Xu M, Onyejuruwa A, et al, 2019. Tropical cyclone damages in Mainland China over 2005-2016: losses analysis and implications[J]. Environ Dev Sustain, 21(6): 3077-3092.
- Zhao Y, Gong Z W, Wang W H, et al, 2014. The comprehensive risk evaluation on rainstorm and flood disaster losses in China mainland from 2004 to 2009: based on the triangular gray correlation theory[J]. Nat Hazards, 71(2): 1001-1016.

(本文责编: 戴洋)