史瑞琴,夏智宏,秦鹏程,等.2024.基于低温-雨雪-冻雨综合强度指数的湖北省冰冻事件分型及灾损评估[J].暴雨灾害,43(4):448-457.
SHI Ruiqin, XIA Zhihong, QIN Pengcheng, et al. 2024. Typing and disaster loss evaluation of freezing events based on the comprehensive intensity index of low temperature,rainfall/snowfall and freezing in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):448-457 (in Chinese).
doi:10.12406/byzh.2024-078

基于低温-雨雪-冻雨综合强度指数的湖北省冰冻事件分型及灾损评估

史瑞琴[1],夏智宏[1],秦鹏程[1],洪国平[1],赵小芳[1],温泉沛[1],刘莹[2]
(1. 武汉区域气候中心,武汉 430074;2. 湖北省气象信息与技术保障中心,武汉 430074)

摘　要:低温雨雪冰冻是一种复合型气候事件,极端低温雨雪冰冻事件发生频率低,但造成的影响往往十分严重,开展低温雨雪冰冻事件演变特征研究对有效防御和减轻灾害影响具有重要意义。利用湖北省1981—2024年逐日气象观测资料,从低温、雨雪、冻雨等3个方面遴选指标,构建大范围持续低温雨雪冰冻事件综合评估模型;依据致灾因子类型、承灾体受灾特征对事件分型并排序;结合历史灾损数据分析了湖北省1981年以来大范围持续低温雨雪冰冻事件的致灾特征。结果表明:(1) 近44 a湖北省共出现64次大范围持续低温雨雪冰冻事件,平均每年出现1.5次,1月出现频率最高,约占42%,其次是2月,约占34%。(2) 湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件判别为六大分型,其中雨雪为主型占40%,低温雨雪冻雨型占31%,低温雨雪型占16%,其他类型共占13%,最强10次事件均属于低温雨雪冻雨型。(3) 湖北省因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失总体呈增加趋势,但直接经济损失占GDP比重呈下降趋势。(4) 湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件"综合强度指数-直接经济损失"相关关系呈幂指数分布,当事件综合强度指数超过1.85时,直接经济损失迅速增加。

关键词:低温雨雪冰冻;综合强度;分型;重现期;灾损曲线
中图法分类号: P429　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024-078

Typing and disaster loss evaluation of freezing events based on the comprehensive intensity index of low temperature,rainfall/snowfall and freezing in Hubei Province

SHI Ruiqin[1], XIA Zhihong[1], QIN Pengcheng[1], HONG Guoping[1], ZHAO Xiaofang[1], WEN Quanpei[1], LIU Ying[2]

(1. *Wuhan regional climate centre, Wuhan* 430074; 2. *Hubei Meteorological Information and Technological Support Center, Wuhan* 430074)

Abstract: Low temperature, rainfall/snowfall and freezing is a complex climate event. Although extreme low temperature, rainfall/snowfall and freezing events occur infrequently, they often cause serious impacts. Researching evolutionary characteristics of low temperature, rainfall/snowfall and freezing events is of great significance for effective defense and mitigation of disaster impacts. By using daily meteorological observation data from 1981 to 2024 in Hubei and selecting indicators from three aspects: low temperature, rainfall/snowfall and freezing, a comprehensive evaluation model for large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events was established. According to the types of disaster-causing factors and the disaster characteristics of the affected bodies, these events were classified and ranked. Combined with the historical disaster data, the disaster characteristics of large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei since 1981 were then analyzed. The results are as follows. (1) There have been a total of 64 large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei in the past 44 years, with an average of 1.5 occurrences per year. January has the highest frequency of occurrence, accounting for about 42%, followed by February, accounting for about 34%. (2) The large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei are classified into six types, with rain and snow type accounting for 40%, low temperature, rainfall/snowfall and freezing type accounting for 31%, and low temperature, rain, and snow type accounting for 16%, other types ac-

收稿日期: 2024-04-30;**定稿日期:**2024-07-25
资助项目: 2022年湖北省气象局科技基金重点专项(2022Z05);2023年中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J51)
第一作者: 史瑞琴,主要从事气候影响评价和气象灾害风险评估研究。E-mail: 23457495@qq.com
通信作者: 夏智宏,主要从事气象灾害影响评估、GIS应用研究。E-mail: 14694209@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

counting for a total of 13%. The strongest 10 events all belong to low temperature, rainfall/snowfall and freezing type. (3) The direct economic losses caused by low temperature, rainfall/snowfall and freezing disasters in Hubei have shown an overall increasing trend, but the proportion of direct economic losses to GDP has shown a certain decreasing trend, with a relatively small proportion since 2012. (4) The correlation between the comprehensive intensity index and direct economic losses of large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei follows a power curve distribution. When the comprehensive intensity index of the event exceeds 1.85, the direct economic losses increase rapidly.

Key words: low temperature; rainfall/snowfall and freezing; comprehensive intensity; typing; recurrence periods; disaster loss curve

引 言

降水的相态变化主要是液态降水向固态降水的转化，除冰雹外，大多发生在近地面气温0 ℃左右的低温条件下，常见的降水类型有冻雨、雪、雨夹雪和霰等(Stewart et al.，2015)。上述降水类型常混合出现，从而形成低温雨雪冰冻复合灾害，对交通运输、基础设施、人民生命财产安全以及生态系统造成严重影响(Zhou et al.，2011；Stien et al.，2012；云天雨等，2024)。2008年初，中国南方地区发生了历史罕见的低温雨雪冰冻灾害事件，造成贵州、湖北、湖南、安徽等20个省(区、市)1亿多人口受灾，直接经济损失1 500多亿元，受灾区域之广、影响人口之多以及灾情损失之重均极为罕见(肖子牛等，2009；白媛等，2011)。2024年2月，我国南方地区再次遭遇大范围持续低温雨雪冰冻天气，对交通、农业、基础设施等造成严重影响，仅湖北省直接经济损失近80亿元，部分地区灾情重于2008年。

2008年以来，国内外学者针对低温雨雪冰冻灾害开展了大量研究。在低温雨雪冰冻灾害事件识别和评估方面，Cohen等(2014)、Qian等(2014)和Kug等(2015)指出，中国南方地区是低温雨雪冰冻事件发生频次较高的区域，在全球变暖背景下，持续性低温雨雪冰冻事件总体呈减少趋势，但中低纬度受极地冷空气南下影响，发生频次呈增加趋势；周悦等(2016)研究了湖北冻雨时空分布特征，进一步解析了冻雨发生时的气象要素特征；陈正洪(2009)指出短期的降雪和低温对社会危害有限，当积雪深度超过8(19) cm，或者累积最低气温低于−7(−43) ℃，或者累积雪量超过24(54) mm时，才会开始产生严重(极其严重)危害；万素琴等(2008)提出低温雨雪过程综合指数概念，选取最长连续雨雪日数及期间雨雪量、日平均气温≤0.5 ℃连续日数、过程平均气温和极端最低气温等5个指标建立低温雨雪冰冻过程综合指数，基于此评估了2008年湖北省低温雨雪冰冻过程；周月华和郭广芬(2010)基于多指标综合指数建立了灾害性天气过程预评估方案，利用历史统计情景、相似指数年份类比和中短期预报等三种方案，实现了对低温雨雪冰冻等灾害性天气过程和影响的预估；李婷等(2018)利用“致灾强度指数–经济损失率”反演法构建脆弱性曲线，制作了不同重现期河北省雪灾经济损失的风险分布；宗海锋等(2022)利用日平均气温、降水量及雨凇资料，建立了中国南方大范围持续性低温雨雪冰冻灾害事件客观识别方法，揭示了灾害事件关键特征，并指出充沛的水汽供应和大范围强烈的水汽辐合是低温–雨雪灾害事件和低温–雨雪–冰冻灾害事件发生的关键条件。上述研究为认识低温雨雪冰冻灾害的天气气候学特征及其识别和评估提供了重要的基础，但对低温雨雪冰冻复合事件致灾因子的组合类型差异及其产生的影响认识仍不够深入，特别是在全球气候变化背景下，低温雨雪冰冻复合事件的致灾因子及主导类型和产生的灾害影响有何新特征，仍缺少客观定量的分析。

湖北省地处长江中游，东、西、北三面环山，中间低平，略呈向南敞开的不完整盆地，为冬季冷空气南下通道，是低温雨雪冰冻灾害的频发区域之一。2008年初低温雨雪冰冻灾害发生后，湖北省气象局就建立了持续低温雨雪冰冻过程综合评估模型(万素琴等，2008)，随着2018年、2024年低温雨雪冰冻灾害发生，冻雨在复合灾害中的影响逐渐受到关注，以往对冻雨的评价主要是它对架空线路、道路交通等方面的影响，没有将其作为一个单独因子纳入到综合评估模型中，导致原有模型和评估方法应用于当前低温雨雪冰冻灾害评估时出现明显局限性。本文旨在通过对典型灾情过程的分析，修订低温雨雪冰冻事件评估指标，构建低温雨雪冰冻事件评估模型，系统分析湖北省低温雨雪冰冻事件的分型和致灾特征，为科学应对低温雨雪冰冻灾害提供支撑。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文所用资料包括：(1) 气象资料。湖北省76个国家级基本气象站逐日平均气温、最低气温、降水量、降雪、积雪、电线积冰直径(含导线本身直径)和雨凇观测资料，资料年限为1981年1月1日至2024年3月31日，来源于湖北省气象信息与技术保障中心。(2) 灾情资料。湖北省雪灾灾损数据，来源于湖北省应急管理

局、湖北省第一次自然灾害综合风险普查领导办公室，对多渠道收集的不同年份灾情损失数据利用折算系数进行预处理。

1.2 研究方法

本文在构建低温雨雪冰冻事件评估模型时，对低温、雨雪、冻雨三种灾害的强度指数进行归一化计算(叶宗裕等，2008)，再求和得到综合强度指数。通过线性、多项式、指数、高斯、幂指数等回归方法，绘制“综合强度指数-直接经济损失”拟合曲线，根据拟合度检验结果分析湖北省低温雨雪冰冻事件综合强度指数与灾损两者的变化关系。运用广义帕雷托分布(General Pareto Distribution，GPD)推算了不同重现期下湖北省低温雨雪冰冻事件及分灾种灾害事件的重现期，具体方法(江志红等，2009)如下

GPD的分布函数为

$$F(x)=1-\left[1-k\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right]^{1/k}\quad k\neq 0,\ \xi\leqslant x\leqslant\frac{\alpha}{k} \tag{1}$$

其相应的分布密度函数为

$$f(x)=\left(\frac{1}{\alpha}\right)\left[1-k\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)\right]^{1/k-1} \tag{2}$$

式中，ξ为门限值，α为尺度参数，k为形状参数，而x是随机变量。

根据计算得到的多年平均年交叉率和得到的GPD参数估计，利用下面的分位数公式即可计算GPD的分位数。

$$xT=\xi+\frac{\alpha}{k}\left[1-(XT)^{-k}\right] \tag{3}$$

式中，T是根据本文研究需要选定的重现期值，包括5 a、10 a、20 a和50 a。

2 大范围持续低温雨雪冰冻事件识别及评估模型改进

2.1 低温雨雪冰冻事件识别

某一测站持续低温雨雪冰冻事件指在一次连续5 d或以上雨雪过程的同时、之前或之后也出现连续多日日平均气温≤0 ℃的连续低温过程，且连续雨雪过程和连续低温过程有至少1 d的重叠。把连续雨雪和连续低温两个开始日最早的日期，到两个结束日最晚的日期，这一时间段内被认为该测站出现一次持续低温雨雪冰冻事件。其中，持续雨雪天气定义为：连续5 d及以上的雨雪天气(允许期间有1 d间歇)，连续7 d及以上的雨雪天气(允许期间有不连续的2 d间歇)，连续10 d及以上的雨雪天气(允许期间有不连续的3 d间歇)。

根据1981年以来湖北省历次持续低温雨雪冰冻事件的发生范围进行判定，某日期段从第一日至最后一日，全省范围内有>10%的测站出现持续低温雨雪冰冻事件，则表示该时间段发生了大范围持续低温雨雪冰冻事件。

2.2 低温雨雪冰冻事件评估模型改进

2.2.1 低温雨雪冰冻事件评估指标修订

本文基于文献(万素琴等，2008)已有指标，依据低温雨雪冰冻过程的天气气候学特点，增加最大积雪深度、电线积冰直径等直观表达灾害破坏性能量因子；同时，为更好地刻画1984、1990、2018、2024年等典型冰冻年冻雨特征，增加电线积冰最大直径≥5 mm站数这一指标；最后确定选用连续雨雪日数、雨雪总量和最大积雪深度作为评估雨雪部分的三项指标；选用连续低温日数、过程平均气温和极端最低气温作为评估低温部分的三项指标；选用冻雨日、平均电线积冰最大直径、电线积冰最大直径≥5 mm站数作为评估冻雨部分的三项指标(表1)。

表1 大范围持续低温雨雪冰冻事件评估指标选取

Table 1 Selection of evaluation indicators for large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events

指标序号	雨雪指标	低温指标	冻雨指标
指标1	连续雨雪日数	连续低温日数	冻雨日数
指标2	雨雪总量	过程平均气温	平均电线积冰最大直径
指标3	最大积雪深度	极端最低气温	电线积冰最大直径≥5 mm站数

2.2.2 评估指标无量纲处理

为消除不同指标单位的影响，在建模时需对各个指标进行无量纲化处理(叶宗裕等，2008)。

设各指标因子分别为

$$y(i)=\{d_s(i),p_s(i),h_s(i),d_t(i),t_m(i),t_n(i),d_f(i),d_m(i),n_5(i)\}$$

无量纲化后指标因子值为

$$k(i)=\left\{\frac{d_s(i)}{\overline{d_s}},\frac{p_s(i)}{\overline{p_s}},\frac{h_s(i)}{\overline{h_s}},\frac{d_t(i)}{\overline{d_t}},\frac{t_m(i)}{\overline{t_m}},\frac{t_n(i)}{\overline{t_n}},\frac{d_f(i)}{\overline{d_f}},\frac{d_m(i)}{\overline{d_m}},\frac{n_5(i)}{\overline{n_5}}\right\}$$

其中，i=1,2,3,……n，为事件序号，n为1981年1月1日至2024年3月31日事件数；$d_s(i)$、$p_s(i)$、$h_s(i)$、$d_t(i)$、$t_m(i)$、$t_n(i)$、$d_f(i)$、$d_m(i)$、$n_5(i)$分别为第i次事件的连续雨雪日数、雨雪总量、最大积雪深度、连续低温日数、过程平均气温、极端最低气温、冻雨日、平均电线积冰最大直径和电线积冰最大直径≥5 mm站数，$\overline{d_s}$、$\overline{p_s}$、$\overline{h_s}$、$\overline{d_t}$、$\overline{t_m}$、$\overline{t_n}$、$\overline{d_f}$、$\overline{d_m}$、$\overline{n_5}$分别为n次事件的连续雨雪日数、雨雪总量、最大积雪深度、连续低温日数、过程平均气温、极端最低气温、冻雨日、平均电线积冰最大直径和电线积冰最大直径≥5 mm站数的平均值。

2.2.3 低温雨雪冰冻事件评估模型

对于低温雨雪冰冻灾害，依据致灾机理，考虑不同的加权方案确定综合强度指数。雨雪、低温、冻雨对不同承灾体的影响各有侧重(周月华和郭广芬，2010)，如雨雪量大，积雪深，压坏农作物、折断林木，形成机械性损伤，损坏电力、通信和公共基础设施等；气温持续过低，冻坏农作物，造成鱼类、牲畜患病冻死；冰冻造成越冬作物植株和各种林木果树的生理性损伤，还会危及交通安全等；极端冻雨给林木、电力输送和通信带来很大危害，故采用等权重方案搭建某次大范围持续低温雨雪冰冻事件综合评估模型，计算公式如下

$$Z(i)=Z_s(i)+Z_t(i)+Z_f(i) \tag{4}$$

其中

$$Z_s(i)=f\left[\left(\frac{d_s(i)}{\overline{d_s}}+\frac{p_s(i)}{\overline{p_s}}+\frac{h_s(i)}{\overline{h_s}}\right)\times\frac{m_s(i)}{n}\right] \tag{5}$$

$$Z_t(i)=f\left[\left(\frac{d_t(i)}{\overline{d_t}}+\frac{t_m(i)}{\overline{t_m}}+\frac{t_n(i)}{\overline{t_n}}\right)\times\frac{m_t(i)}{n}\right] \tag{6}$$

$$Z_f(i)=f\left[\left(\frac{d_f(i)}{\overline{d_f}}+\frac{d_m(i)}{\overline{d_m}}+\frac{n_5(i)}{\overline{n_5}}\right)\times\frac{m_f(i)}{n}\right] \tag{7}$$

式(4)~(7)中，$Z(i)$为第i次事件的综合强度指数；$Z_s(i)$、$Z_t(i)$、$Z_f(i)$分别为第i次事件的雨雪强度、低温强度和冻雨强度指数；$m_s(i)$、$m_t(i)$、$m_f(i)$分别为第i次事件涉及的雨雪、低温和冻雨站数，n为测站总数；$f[]$为归一化计算。

3 结果与分析

3.1 低温雨雪冰冻事件分布特征

3.1.1 发生频次及时间分布特征

根据低温雨雪冰冻事件评估模型，识别出1981—2024年湖北省共出现64次大范围持续低温雨雪冰冻事件，平均每年出现1.5次。20世纪80年代出现频率最高，达18次；20世纪90年代至21世纪10年代均为13次；2020年以来共出现7次。近44 a中，出现3次及以上的概率约为11%，最多年出现频次可达5次(1984年12月至1985年2月)，出现2次及以上的概率约为43%，至少出现1次的概率约为84%，不出现的概率约为16%(7 a)。

从年内分布来看，大范围持续低温雨雪冰冻事件主要出现在11月至次年3月，其中出现在1月的频率最高，约占42%，其次是2月，约占34%，出现在12月、3月和11月的频率分别为17%、5%和2%。年内出现时间最早的大范围持续低温雨雪冰冻事件发生在2009年11月15—18日，出现时间最晚的事件发生在1998年3月19—24日。

3.1.2 指标因子变化特征

从连续雨雪日数看(图1a)，持续5~7 d事件占69%，7 d以上事件占31%；偏长期集中分布在20世纪80年代前期、80年代末至2008年，2008年后偏长事件明显多于偏短事件。从雨雪总量看(图1a)，不足30 mm事件占70%，超过30 mm事件占30%；偏多年主要分布在20世纪80年代末至2008年，2008年后以偏少为主，但近几年又呈波动增加趋势。最大积雪深度不足10 cm事件占42%，10~20 cm事件占44%，超过20 cm事件占14%。连续雨雪日数和雨雪总量具有较明显的年代际变化特征，且连续雨雪日数有一定减少趋势。

从连续低温日数看(图1b)，23%事件无低温，77%事件低温平均持续4.8 d，其中1~5 d事件占77%，超过5 d事件占23%。过程平均气温介于-2.3~-0.4 ℃之间，仅4次事件平均气温低于-2 ℃。从极端最低气温看(图1b)，38%事件高于-8 ℃，39%事件低于-8 ℃；明显偏低的年份主要分布在20世纪80年代中期、80年代末至90年代中期、21世纪10年代初至2018年。在湖北省冬季平均气温平均每10年升高0.25 ℃、极端低温事件平均每10 a减少4站的气候变暖背景下，低温雨雪冰冻事件中过程平均气温和极端最低气温没有呈现出整体升高趋势，特别是21世纪10年代和2024年的低温雨雪冰冻事件中低温较明显。

从冻雨日数看(图1c)，23%事件无冻雨出现，61%事件冻雨持续1~3 d，16%事件冻雨持续4~10 d，同以往中国多数地区冻雨日数总体下降这一特征有区别(宗志平等，2013；汪卫平等，2020)，湖北省冻雨日数在2008年前也为下降趋势，但近年来几次明显冻雨过程的出现使整体趋势转降为升。从平均电线积冰最大直径看，1982、1989、2000、2018年四个年份电线积冰最大直径平均值大于36 mm。从电线积冰最大直径≥5 mm站数看(图1c)，75%事件电线积冰最大直径未超过5 mm，另外25%事件电线积冰最大直径超过5 mm的站数大于3个的事件均出现在近7 a中，一定程度上反映出冻雨极端性在增强。

3.2 低温雨雪冰冻事件分型

从气象要素、低温雨雪冰冻事件的承灾体受灾特征分类分析，低温雨雪冰冻事件大致分为三类：雨雪事件、低温事件、冻雨事件。结合历次事件中三类灾害强度(图2)及同步性，将64次事件组合成多种不同类型的灾害事件，主要分为几种形态：(1) 单灾型，包括雨雪为主型、低温为主型、冻雨为主型；(2) 两两组合型，包括低温雨雪型、低温冻雨型；(3) 三种灾害交织型，即低温雨雪冻雨型。以2024年2月1—7日事件

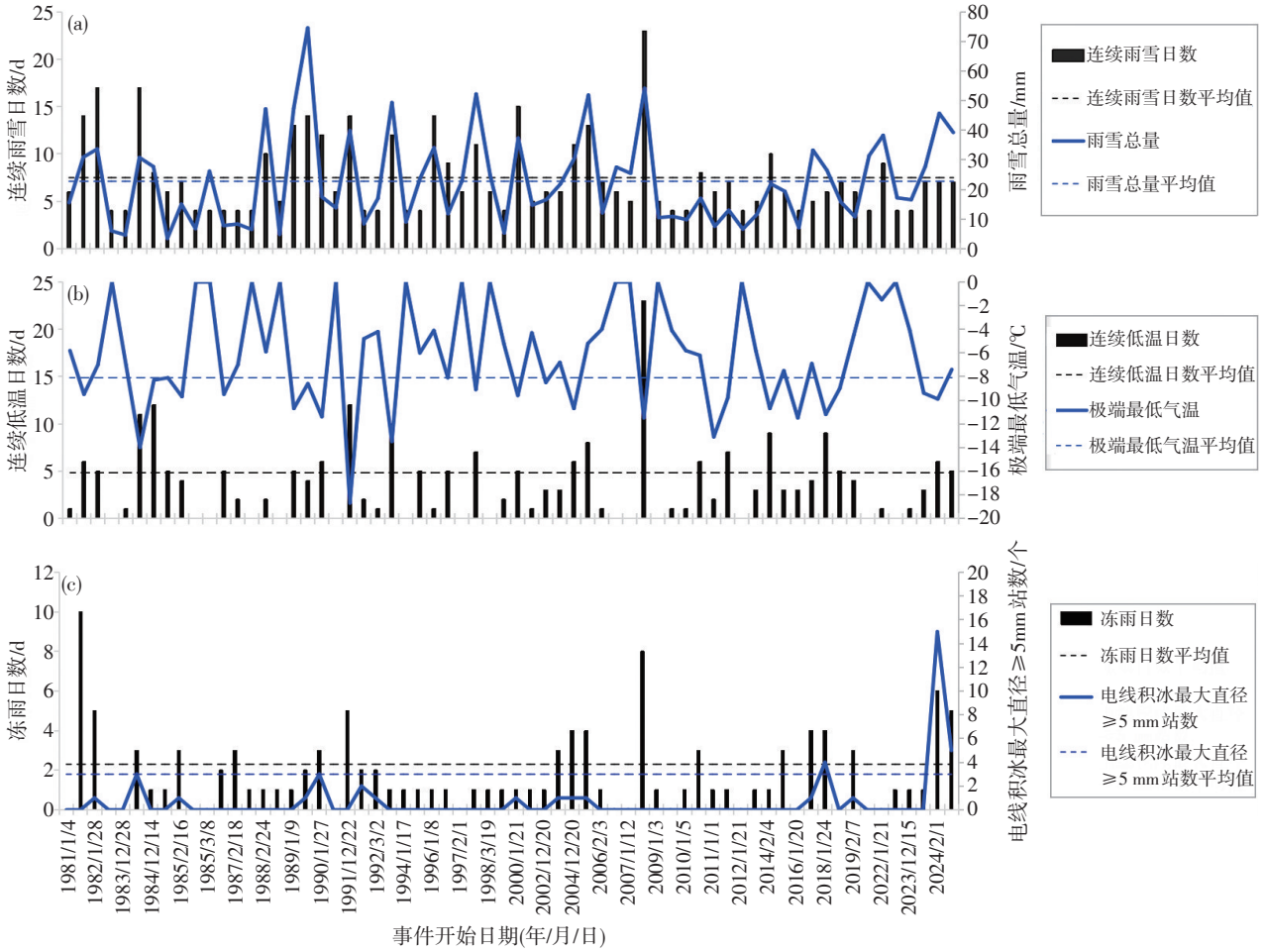


图1 1981—2024年湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件中雨雪(a)、低温(b)、冻雨(c)指标变化

Fig. 1 Variation characteristics of rain and snow (a), low temperature (b) and freezing (c) indexes in large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei during 1981–2024

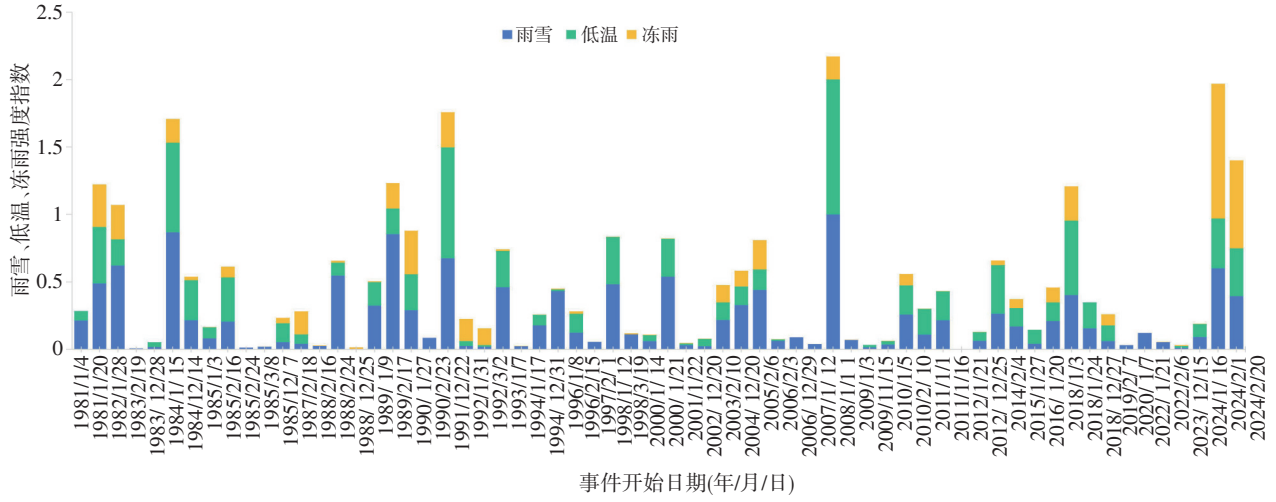


图2 1981—2024年湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件分灾种(雨雪、低温、冻雨)及综合强度指数

Fig. 2 Indexes of separated disasters (rain and snow,low temperature and freezing)and comprehensive intensity for large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei during 1981–2024

(简称“2024.2.1”事件)为例,它实际上包含了大范围持续性雨雪、低温、冻雨灾害事件的多种组合。

3.2.1 单灾型

雨雪为主型事件占40%,这类事件发生频次最高,雨雪总量5.0~38.3 mm,最大积雪深度不超过20 cm;最强雨雪为主型事件出现在1996年1月8—21日,全省83%的区域出现雨雪且持续14 d;除本次事件综合强度指数为0.45外,其余各事件综合强度指数介于

0.01～0.13之间。低温为主型事件占5%，且均出现在1月，连续低温日数3～5 d，过程平均气温-2.3～-1.03 ℃，极端最低气温-11.5～-8.1 ℃，综合强度指数介于0.14～0.19之间，超过96%的雨雪为主型事件(图3)。冻雨为主型事件占3%，这类事件发生频次最低，综合强度指数介于0.12～0.16之间，1992年2—3月两次低温雨雪冰冻事件均属于这一类型，平均电线积冰最大直径超过30 mm，且均有站点电线积冰最大直径超过5 mm，此类事件综合强度接近低温为主型事件。

3.2.2 两两组合型

低温雨雪型事件占16%，90%事件出现在1月；雨雪总量13.0～52.3 mm，最大积雪深度12～38 cm，过程平均气温-1.68～-0.63 ℃，极端最低气温-13.5～-5.8 ℃；最强低温雨雪型事件出现在1998年1月12—22日，全省75%的区域出现低温雨雪且持续11 d，雨雪、低温强度分别排第10、9位，综合强度指数0.83；2000年1月21日—2月4日事件持续15 d，雨雪、低温强度分别排第8、12位，综合强度指数0.82；其余各事件综合强度指数介于0.26～0.74之间。低温冻雨型事件占5%，过程平均气温-1.72～-0.95 ℃，极端最低气温-9.5～-4.5 ℃，冻雨持续2～3 d，平均电线积冰最大直径28～29 mm，通常电线积冰最大直径不超过32 mm，最强低温冻雨型事件发生在1987年2月18—21日，全省22%的区域低温持续2 d，42%的区域冻雨持续3 d，冻雨范围历史第5；历次低温冻雨型事件综合强度指数介于0.23～0.28之间，这类事件综合强度总体上弱于低温雨雪型事件(图3)。

3.2.3 三种灾害交织型

低温雨雪冻雨型事件占31%，连续雨雪日数6～23 d，雨雪总量大多介于20.0~74.6 mm之间，最大积雪深度大多介于9~48 cm，过程平均气温-2.3～-0.7 ℃，极端最低气温-18.7~-7 ℃，平均电线积冰最大直径28.0~37.6 mm，近70%事件中有1~15站电线积冰最大直径≥5 mm；最强为2008年1月11日—2月3日事件(简称“2008.1.11”事件)，过程持续23 d，雨雪总量54.2 mm，过程平均气温-1.64 ℃，极端最低气温-11.5 ℃，冻雨持续8 d，综合强度指数2.17。在20次低温雨雪冻雨型事件中，50%的事件综合强度指数超过最强的低温雨雪型事件(图3)，且这10次事件综合强度指数分别位列历史前十位(表2)，可见多灾种交织型组合事件相较其他事件更易致灾，这一结论与“事实上容易造成严重损失的都是范围广、持续时间长的大范围低温雨雪冰冻复合灾害”(唐熠等，2013；李倩等，2023)结论一致。

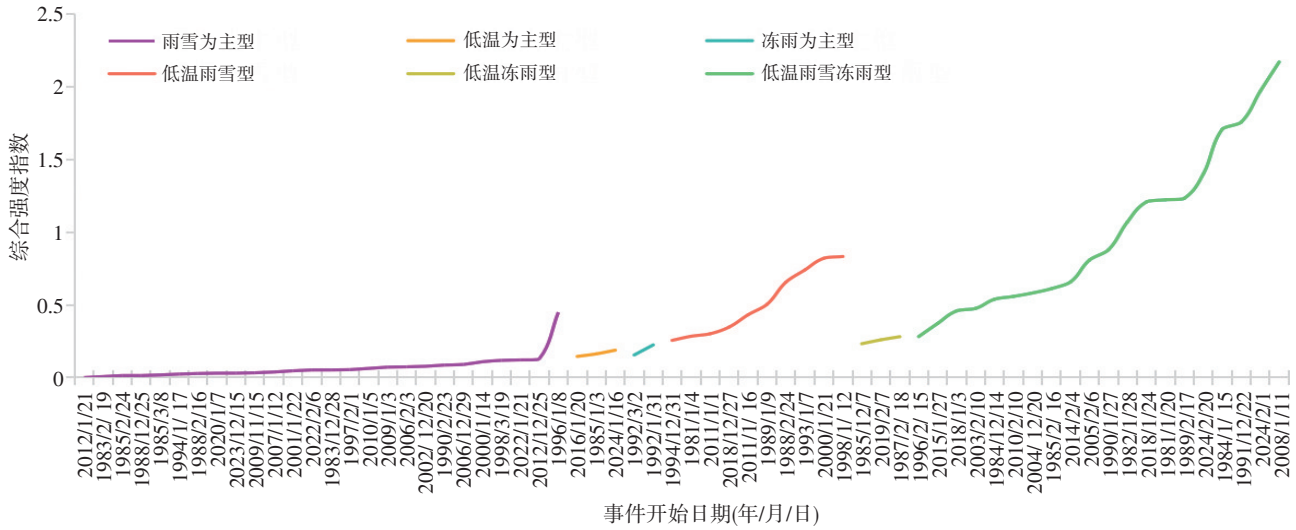


图3 1981—2024年湖北省64次大范围持续低温雨雪冰冻事件不同分型下的综合强度指数

Fig. 3 Comprehensive intensity index under different subtypes of large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei during 1981-2024

为进一步刻画多灾种交织型组合事件的主导灾害，下文以最强10次大范围持续低温雨雪冰冻事件为例，从历次过程的特征因子出发，分析特征因子大小、分灾种强度及重现期。表2列出了湖北省1981年以来最强10次大范围持续低温雨雪冰冻事件特征值及排位。

2018年1月24日—2月1日事件(简称“2018.1.24”事件)、2024年2月20—26日事件(简称“2024.2.20”事件)中连续雨雪日数、雨雪总量、最大积雪深度不突出，主导灾害为低温和冻雨，前一次事件低温持续9 d，22站出现冻雨且4站电线积冰最大直径≥5 mm；后一次事件冻雨持续5 d，50站出现冻雨且5站电线积冰最大直径≥5 mm；两次事件综合强度分别排第8、5位，分别达5 a一遇和10 a一遇。

1989年2月17日—3月2日事件(简称“1989.2.17”

事件)、1982年1月28日—2月13日事件(简称“1982.1.28”事件)中平均气温和极端最低气温不突出,主导灾害为雨雪和冻雨,前一次事件连续雨雪日数历史第4位,雨雪总量(74.6 mm)、最大积雪深度(48 cm)均为历史最大,冻雨范围历史第五,平均电线积冰最大直径37 mm,雨雪、冻雨强度分别排第3、9位;后一次事件雨雪范围历史第3位,连续雨雪日数历史第2位,冻雨范围历史第6位,冻雨持续5 d,平均电线积冰最大直径37.6 mm,雨雪、冻雨强度分别排第5、6位;两次事件综合强度分别排第6、9位。

1990年1月27日—2月7日事件(简称“1990.1.27”事件)主导灾害为冻雨,35站出现冻雨且持续3 d,平均电线积冰最大直径32.38 mm且3站电线积冰最大直径≥5 mm,冻雨强度历史第3位,使该事件综合强度排位大幅提前。

其余5次事件中低温、雨雪、冻雨均为主导灾害,5次事件均达10~50 a一遇。以“2008.1.11”事件为例,雨雪持续天数历史最长,雨雪总量历史第2位,最大积雪深度28 cm,另外6站也达到或超过20 cm,雨雪100%覆盖全省,雨雪强度历史最强;低温持续天数历史最长,极端最低气温倒数第4位,低温100%覆盖全省,低温强度历史最强;冻雨持续天数历史第2位,冻雨强度历史第11位,综合强度指数2.17,为历史最强事件。可见主导灾害的强度会影响事件严重程度。

表2 1981—2024年湖北省最强10次大范围持续低温雨雪冰冻事件特征值及排位

Table 2 Characteristic values and ranking for ten strongest large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei during 1981–2024

序号	开始时间/(年/月/日)	结束时间/(年/月/日)	连续雨雪日数/d	雨雪总量/mm	最大积雪深度/cm	雨雪强度指数/排位	连续低温日数/d	过程平均气温/℃	极端最低气温/℃	低温强度指数/排位	冻雨日数/d	平均电线积冰最大直径/mm	电线积冰最大直径≥5 mm站数/个	冻雨强度指数/排位	综合强度指数/排位
1	2008/01/11	2008/02/03	23	54.2	28	1.00/1	23	−1.64	−11.5	1.00/1	8	28.86	0	0.17/11	2.17/1
2	2024/02/01	2024/02/07	7	45.8	29	0.60/6	6	−1.30	−9.9	0.37/6	6	32.59	15	1.00/1	1.97/2
3	1991/12/22	1992/01/04	14	39.9	24	0.67/4	12	−2.29	−18.7	0.82/2	5	30.13	0	0.26/5	1.76/3
4	1984/01/15	1984/01/31	17	30.8	39	0.87/2	11	−1.32	−14.0	0.66/3	3	34.50	3	0.18/10	1.71/4
5	2024/02/20	2024/02/26	7	39.3	13	0.39/15	5	−1.60	−7.4	0.36/8	5	30.51	5	0.65/2	1.40/5
6	1989/02/17	1989/03/02	14	74.6	48	0.85/3	4	−1.20	−8.6	0.19/19	2	37.00	1	0.19/9	1.23/6
7	1981/01/20	1981/02/02	14	30.9	10	0.49/9	6	−1.25	−9.5	0.42/5	10	29.17	0	0.32/4	1.22/7
8	2018/01/24	2018/02/01	6	26.5	21	0.40/14	9	−1.86	−11.2	0.55/4	4	36.25	4	0.25/7	1.21/8
9	1982/01/28	1982/02/13	17	33.7	16	0.62/5	5	−0.99	−7.0	0.19/17	5	37.60	1	0.25/6	1.07/9
10	1990/01/27	1990/02/07	12	17.5	20	0.29/18	6	−1.70	−11.4	0.27/14	3	32.38	3	0.32/3	0.88/10

3.3 低温雨雪冰冻事件灾害损失评估

3.3.1 低温雨雪冰冻事件灾害损失总体演变趋势

湖北省因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失1991—2020年平均为9.7亿元,2008年损失最大,达185亿元,其次是2024年损失80亿元和2018年损失35亿元。从1981—2024年湖北省低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失及其占GDP的比重图(图4)可见,湖北省因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失总体呈弱增加趋势,平均每10 a增加4亿元。因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失占GDP的比重呈

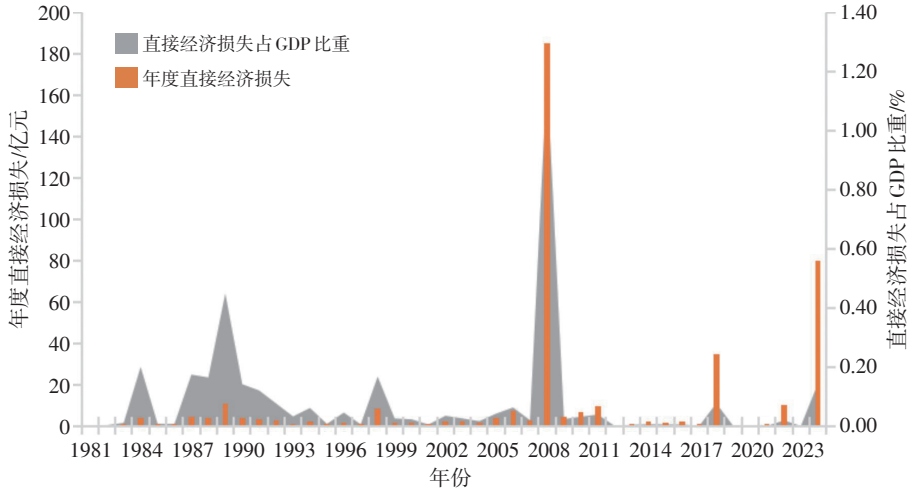


图4 1981—2024年湖北省低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失及其占GDP的比重

Fig. 4 Direct economic losses caused by low temperature, rainfall/snowfall and freezing disasters and their proportion in GDP in Hubei during 1981–2024

一定的下降趋势，占比最高年为2008年(1.2%)；其次是1984—1991年，平均占比0.16%；2012年以来除2018年和2024年两个典型雪灾年外，其他年份因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失占GDP比重持续偏小。

3.3.2 低温雨雪冰冻事件灾害损失对综合强度指数的响应

本文选用经济作为承灾体，以1998—2024年湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件综合强度指数为x轴，直接经济损失为y轴，建立两者关系曲线作为该区域经济的灾损曲线(图5)。对结果进行拟合优度检验，确定系数(R^2)越接近1，残差平方和(SSE)和剩余标准差(RMSE)的数值越小，表明拟合程度越好。由表3可以看出，幂指数的确定系数最大(R^2=0.9788)，对应的残差平方和(SSE=0.02)和剩余标准差(RMSE=0.01)均是最小，拟合优度最佳，因此选择幂指数来表达直接经济损失对综合强度指数的响应。当综合强度指数分别在0.10以下、1.01~1.55之间、1.56~1.85之间、超过1.85时，事件导致的直接经济损失分别呈缓慢增加、较快增加、快速增加、迅速增加趋势。从图5可见，当低温雨雪冻雨型事件的综合强度指数超过1.2时，所造成的直接经济损失很容易超过其他各类型事件的灾损，这与前文指出的“50%的事件综合强度指数超过最强的低温雨雪型事件”所表达的观点相互印证。

3.3.3 2024年两次典型低温雨雪冰冻事件致灾评估

2024年2月1—7日，湖北省出现大范围低温雨雪冰冻天气。其中，1—4日大部小到大雪，2—4日大部平均气温持续低于0 ℃，26站出现冻雨且持续3 d，截至2月4日该事件综合强度指数为1.04，超过排名第10位的“1990.1.27”事件；5—7日大部小雪或雨夹雪，低温持续，冻雨扩大至中东部大部，冻雨强度评估为有记录以来最强，截至2月5日该事件综合强度指数(1.68)已超过排名第6位的“1989.2.17”事件，超10 a一遇，2月6—7日事件综合强度指数大于1.85且直逼2.0，强度已超过1991年12月22日—1992年1月4日事件，升至历史第2位，超20 a一遇(图6)，事件造成的直接经济损失高达66亿元。进一步验证了“事件综合强度指数高于1.85后灾害严重程度迅速增加”这一结

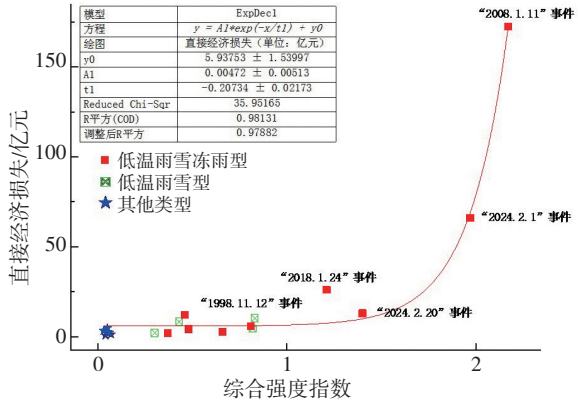


图5 1998—2024年湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件直接经济损失与综合强度指数相关分析

Fig. 5 Correlation analysis between direct economic losses and comprehensive intensity index for large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei during 1998-2024

表3 湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件的直接经济损失与综合强度指数的曲线拟合优度检验

Table 3 Curve fitting goodness test of direct economic losses and comprehensive intensity index for large-scale sustained low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei

拟合曲线类型	确定系数(R^2)	残差平方和(SSE)	剩余标准差(RMSE)
线性函数	0.6218	0.32	0.13
二次多项式	0.8602	0.13	0.08
指数函数	0.7966	0.07	0.03
高斯函数	0.9722	0.02	0.01
幂指数函数	0.9788	0.02	0.01

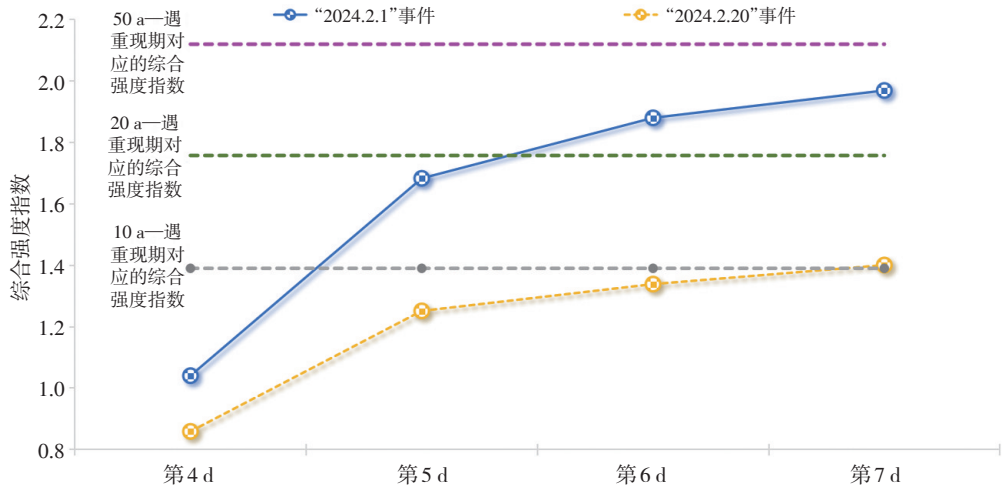


图6 2024年2月湖北省两次大范围持续低温雨雪冰冻事件综合强度指数演变

Fig. 6 Evolution of comprehensive intensity index for two large-scale persistent low temperature, rainfall/snowfall and freezing events in Hubei in February 2024

论。

2024年2月20—26日，湖北省再次出现大范围低温雨雪冰冻天气。其中，20—22日全省大部出现降雪，部分地区出现冻雨，受历史冬季最强寒潮影响，21日开始平均气温持续低于0 ℃；23—24日大部出现小到中雪，部分地区出现大雪和暴雪，冻雨持续；25—26日中东部大部持续小雪或雨夹雪，冻雨范围评估为有记录以来最广，与张芳华等(2024)得出的“2024年2月下旬第二轮低温雨雪冰冻天气过程造成的冻雨范围较第一轮更广”研究结论一致，最大电线积冰直径55 mm(蕲春)；截至2月24日该事件综合强度指数(1.25)超过“1989.2.17”事件，为历史第五强，至26日该事件发展为超10 a一遇事件(图6)。

4 结论与讨论

本文构建了大范围持续低温雨雪冰冻事件综合评估模型，确定了湖北省64次大范围低温雨雪冰冻事件的分型；结合历史灾损数据分析了低温雨雪冰冻灾害事件的演变特征，实现了对不同灾害事件的定量评估。主要结论如下：

(1) 湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件平均每年出现1.5次，1月出现频率最高，约占42%，其次是2月，约占34%。连续雨雪日数和雨雪总量具有较明显的年代际变化特征，20世纪80年代末至2008年明显偏多；在气候变暖大背景下，低温雨雪冰冻事件中平均气温和极端最低低温并没有呈现整体升高趋势；近年来几次明显冻雨事件使湖北省冻雨日数整体变化趋势未降反升。

(2) 湖北省大范围持续低温雨雪冰冻事件判别为六大分型，其中低温雨雪冻雨型占31%，最强十次事件均属于这一类型，但其主导灾害仍有差别。分灾种来看，最强10次雨雪事件以20世纪80年代至90年代最多，最强10次低温事件有4次出现在近10 a，最强雨雪、最强低温事件均出现在2008年初；最强10次冻雨事件9成出现在20世纪80年代至90年代及近10 a，2024年2月初出现历史最强冻雨事件。

(3) 湖北省因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失总体有一定的增加趋势，平均每10 a增加4亿元。因低温雨雪冰冻灾害造成的直接经济损失占GDP的比重呈一定的下降趋势，占比最高年为2008年(1.2%)；2012年以来该比重以偏小为主。低温雨雪冰冻事件“综合强度指数-直接经济损失”关系呈幂指数分布，当综合强度指数超过1.85时，直接经济损失随综合强度指数的增大而迅速增加。

大范围持续低温雨雪冰冻事件是湖北省冬季主要气象灾害，2024年2月更是出现连续两次大范围低温雨雪冰冻事件，出现历史最强冻雨，给交通、电力、农业及公众安全等方面造成严重影响。需要指出的是，尽管本文从影响范围、持续时间、致灾特征等灾害影响特征角度对湖北省64次大范围雨雪冰冻事件进行了分析，其中仍有许多科学问题亟需深入探讨。后续可以基于不同类型事件的关键环流特征进行天气学解析，尝试建立分型预报方法，为冬季大范围持续低温雨雪冰冻天气事件的预测预报提供技术支撑。

参考文献(References):

白媛,张建松,王静爱.2011.基于灾害系统的中国南北方雪灾对比研究—以2008年南方冰冻雨雪灾害和2009年北方暴雪灾害为例[J].灾害学,26(1):14-19. Bai Y, Zhang J S, Wang J A. 2011. A Comparative study of snow disasters in northern and southern China—taking freezing and snow disaster in 2008 and snowstorm disaster in 2009 as examples [J]. Journal of Catastrophology,26(1):14-19 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2011.01.004

陈正洪.2009.社会对极端低温雨雪冰冻灾害应急响应程度的定量评估研究[J].华中农业大学学报(社会科学版),87(3):119-122. Chen Z H. 2009. A special method and grading index on the quantitative assessment about the social emergent response to extreme low temperature, raining and snowing, icing disasters [J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition),87(3):119-122 (in Chinese). doi:10.13300/j.cnki.hnwkxb.2010.03.007

江志红,丁裕国,朱莲芳,等.2009.利用广义帕雷托分布拟合中国东部日极端降水的试验[J].高原气象,28(3):573-580. Jiang Z H, Ding Y G, Zhu L F, et al. 2009. Extreme precipitation experimentation over eastern China based on generalized pareto distribution [J]. Plateau Meteorology,28(3):573-580 (in Chinese). doi:cnki:sun:gyqx.0.2009-03-012

李倩,闫正涛,许映军.2023. 1951—2020年中国南方地区低温雨雪冰冻危险性评估[J].地理科学,43(1):163-172. Li Q, Yan Z T, Xu Y J. 2023. Assessment of low temperature, rain/snow and freezing events of the southern China from 1951 to 2020 [J]. Scientia Geographica Sinica, 43(1):163-172 (in Chinese). doi:10.13249/j.cnki.sgs.2023.01.017

李婷,孙玉龙,陈笑娟,等.2018.基于经济损失的河北省雪灾风险定量评估[J].灾害学,33(4):72-77. Li T, Sun Y L, Chen X J, et al. 2018. Quantitative risk assessment of snow disaster in Hebei Province based on economic loss [J]. Journal of Catastrophology,33(4):72-77 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000-811X.2018.04.014

唐熠,周秀华,郑传新,等.2019.广西重大低温雨雪冰冻过程500 hPa信号场异常特征分析[J].气象,45(10):1446-1456. Tang Y. Zhou X H, Zheng C X, et al. 2019. Analysis of abnormal characteristics at 500 hPa signal field in major cryogenic freezing rain and snow processes in Guangxi [J]. Meteorological Monthly,45(10):1446-1456 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-8411.2019.01.009

万素琴,周月华,李兰,等.2008.低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术[J].气象,34(11):40-46. Wan S Q, Zhou Y H, Li L, et al. 2008. A multi-index synthetic assessment method for extreme climate events of sleeting and freezing with low temperature [J]. Meteorological Monthly, 34(11):40-46 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.11.006

汪卫平,杨修群,张东海.2020.中国雨淞的时空变化[J].气象,46(5):666-674. Wang W P, Yang X Q, Zhang D H. 2020. Spatioternporal changes of glaze in China [J]. Meteorological Monthly,46(5):666-674 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.05.007

肖子牛,叶殿秀,王凌. 2009.中国气象灾害年鉴(2009) [M].北京:气象出版社:45-52. Xiao Z N, Ye D X, Wang L. 2009. Yearbook of meteorogical disasters in China (2009) [M]. Beijing:Meteorological Press:45-52(in Chinese)

叶宗裕.2003.关于多指标综合评估中指标正向化和无量纲化方法的选择[J].浙江统计,12:24-25. Ye Z Y. 2003. The choice of the method of positive normalization and nondimensionalization in multi-index comprehensive evaluation [J]. Zhejiang Statistics,12:24-25 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674-8905.2003.04.009

云天雨,孟莹莹,陈玉鑫,等.2024.一次极端暴雨事件中罕见冻雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象, Yun T Y, Meng Y Y, Chen Y X, et al. 2024. Analysis of the causes of rare freezing rain in an extreme snowstorm event [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese). https://link.cnki.net/urlid/65.1265.P.20240521.1100.017

张芳华,许先煌,权婉晴,等. 2024. 2024年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析[J].暴雨灾害. Zhang F H, Xu X H, Quan W Q, et al. 2024. Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024-095

周悦,许冠宇,高正旭,等.2016.湖北省冻雨天气特征及其判定方法研究[J].气象科技,44(6):950-955. Zhou Y, Xu G Y,Gao Z X, et al. 2016. Characteristics and discrimination method of freeezing rain weather in Hubei Province [J]. Meteorological Science and Technology,44(6):950-955 (in Chinese). doi:10.19517/j.1671-6345.2016.06.015

周月华,郭广芬.2010.基于多指标综合指数的灾害性天气过程预评估方案[J].气象,36(9):87-93. Zhou Y H, Guo G F. 2010. Pre-evaluation method of disastrous weather progress based on multi-factor comprehensive index [J]. Meteorological Monthly,36(9):87-93 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.014

宗海锋,布和朝鲁,彭京备,等.2022.中国南方大范围持续性低温、雨雪和冰冻组合性灾害事件：客观识别方法及关键特征[J].大气科学,46(5):1055-1070. Zong H F, Bueh Cholaw, Peng J B, et al. 2022. Combined disaster events of extensive and persistent low temperatures, rain/snow, and freezing in southern China: objective identification and key features [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(5):1055-1070 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21052

宗志平,马杰,张恒德,等.2013.近几十年来冻雨时空分布特征分析[J].气象,39(7):813-820. Zong Z P, Ma J, Zhang H D, et al. 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades [J]. Meteorological Monthly,39(7):813-820 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.002

Cohen J, Screen J, Furtado J, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather [J]. Nature Geoscience,7(9):627-637.doi:10.1038/ngeo2234

Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. 2015. Two distinct influences of artic warming on cold winters over North America and East Asia [J]. Nature Geoscience,8(10):759-762. doi:10.1038/ngeo2517

Qian X, Miao Q L, Zhai P M, et al. 2014. Cold-wet spells in mainland China during 1951-2011 [J]. Nat Hazards,74(2):931-946. doi:10.1007/s11069-014-1227-z

Stewart R E, Theriault J M, Henson W. 2015. On the characteristics of and processes producing winter precipitation types near 0℃[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,96(4):623-639. doi:10.1175/BAMS-D-14-00032.1

Stien A, Ims R A, Albon S D, et al. 2012. Congruent responses to weather variability in high arctic herbivores [J]. Biology Letters,8(6):1002-1005. doi:10.1098/rsbl.2012.0764

Zhou B, Gu L, Ding Y, et al. 2011. The great 2008 Chinese ice storm: it's socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned [J]. Bull American Meteorological Society,92(1):47-60. doi:10.1175/2010BAMS2857.1

（责任编辑　何明琼）