温泉沛,周月华,李兰,等.2024.湖北省持续低温雨雪过程评估与分析[J].暴雨灾害,43(4):440-447. WEN Quanpei, ZHOU Yuehua, LI Lan, et al. 2024. Evaluation and analysis of continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(4):440-447 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-108

湖北省持续低温雨雪过程评估与分析

温泉沛[1],周月华[1],李兰[1],史瑞琴[1],夏智宏[1],杜良敏[1],秦鹏程[1],魏华兵[2]
(1. 武汉区域气候中心,武汉 430074;2. 湖北省咸宁市气象局,咸宁 437100)

摘　要: 气候变化背景下,极端持续低温雨雪过程时有发生,给社会生活带来诸多不利影响,为了进一步评估持续低温雨雪天气,对湖北省单站持续低温雨雪过程的评估指标进行了修订,同时建立区域性持续低温雨雪过程评估模型,并将修订后的评估指标应用于湖北省单站及区域性持续低温雨雪过程的梳理及分析。结果表明:(1) 湖北省最严重的5次区域性持续低温雨雪过程分别出现在1954、1969、1977、1984和2008年,最严重的是1954年12月24日—1955年1月18日的过程,其次是2008年1月12日—2008年2月5日的过程。(2) 湖北省区域性持续低温雨雪过程的易发区主要集中在鄂西的高山或半高山地区、江汉平原荆州一带、汉江河谷一带、鄂东南南部低山平原地区以及鄂东北山脉的缺口处。(3) 气候变暖的背景下,湖北省单站和区域性持续低温雨雪过程均是在20世纪80年代前发生次数多,90年代后属于减少的阶段,但其强度更趋极端。

关键词: 湖北省;持续性低温雨雪;过程评估;指标修订
中图法分类号: P468.0+2　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-108

Evaluation and analysis of continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province

WEN Quanpei[1], ZHOU Yuehua[1], LI Lan[1], SHI Ruiqin[1], XIA Zhihong[1], DU Liangmin[1], QIN Pengcheng[1], WEI Huabing[2]

(1. *Wuhan Regional Climate Center, Wuhan* 430074; 2. *Xianning Meteorological Bureau, Xianning* 437100)

Abstract: Under the background of climate change, extreme and continuous low temperature rain and snow processes occur from time to time, bringing many adverse effects to social life. In order to further evaluate the continuous low temperature rain and snow weather,. In order to further restore the disaster scenario, the indicators of the evaluation of the continuous low temperature rain and snow process at a single station in Hubei province were revised, and the regional evaluation model of the continuous low temperature rain and snow process was further established. The revised evaluation index was applied to the evaluation of single station and regional continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province. The results showed that: (1) The five most serious regional continuous low temperature rain and snow processes occurred in 1954, 1969, 1977, 1984 and 2008, respectively. The most serious process was from December 24, 1954 to January 18, 1955, followed by January 12, 2008 to February 5, 2008. (2) The regions prone to regional continuous low temperature rain and snow processes in Hubei Province were concentrated in the alpine or semi-alpine regions of western Hubei, Jingzhou area in Jianghan Plain, Hanjiang River valley, low mountain plain area in Southeastem Hubei and the gap of Mountains in northeast Hubei Province. (3) Under the background of climate warming, both single-station and regional continuous low temperature rain and snow processes in Hubei Province occurred more frequently before the 1980s, and decreased after the 1990s, but the severity of the events became more extrem.

Key words: Hubei province; continuous low temperature rain and snow; process assessing; revision of indices

引 言

自1990年联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change,IPCC)第一份报告发布以来,越来越多的科学证据表明,地球正在变暖,气候变化和极端事件正日益影响着世界各地自然系统和人类生活,且影响范围和程度比以前更大。湖北省位于北亚热带季风气候区,地处长江中

收稿日期: 2023-05-26;**定稿日期:**2023-11-16
资助项目: 湖北省气象局科技基金重点专项(2022Z05-14);中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J051)
第一作者: 温泉沛,主要从事气象灾害风险评估研究。E-mail: wenquanpei@foxmail.com
通信作者: 史瑞琴,主要从事气象灾害风险评估研究。E-mail: 23457495@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

游，受东亚季风影响，冬季风爆发时，自北向南出现强烈降温的同时，往往会出现大范围雨雪并存天气，对经济社会和人民生活带来严重影响。如2008年中国南方地区出现的大范围低温雨雪冰冻灾害，造成了巨大经济损失和社会影响，其中湖北省因灾致使农业、交通、电力、通讯等行业严重受损，直接经济损失高达110亿元(陈正洪等，2008；李灿等，2009；汪丽等，2016)。对于持续低温雨雪灾害造成的影响，人们多用直接经济损失来衡量，这是不够的，因为其难以衡量灾害对生态系统造成的更为深远的影响。如1977年1月初的低温雨雪过程，低温冻害导致宜昌地区柑橘遭到毁灭性损失，减产八成以上。此后，当地经历了5个减产年，到1982年才恢复到此前的产量水平(姜海如，2007)。因此，持续低温雨雪灾害既能直接造成经济损失，也能间接导致生态系统功能退化或丧失，还可能因积雪压垮树枝造成枯木增多而引发诸如林火等次生灾害，其带来的生态影响可能绵延数年(薛建辉和胡海波，2008；杨锋伟等，2008；徐雅雯等，2010)。

2008年我国南方大范围低温雨雪冰冻过程造成严重灾害，就此诸多气象工作者展开了相关研究(万素琴等，2008；李登文等，2011；刘红武等，2020)。有的研究着眼于对历史上低温雨雪事件的分析，建立区域性事件的识别方法及评估指标，分析评估区域性低温雨雪事件的特征及灾害影响。如Qian等(2014)利用Zhang等(2011)定义冷湿指数(PT)作为评定低温雨雪冰冻事件强弱的指标，并定义单站和区域持续性低温雨雪事件的标准，对1951—2011年全国持续性雨雪冰冻过程进行普查分析，指出中国南方区域是低温雨雪冰冻事件发生频次较多的区域。也有学者对低温雨雪冰冻的危险或风险区划展开了研究。如毛淑君和李栋梁(2015)使用模糊信息分配方法划分中国南方出现低温雨雪冰冻天气时各气象要素的等级，计算各等级出现的概率，选取合理的气象要素条件建立了低温雨雪冰冻综合评估指数，并给出了中国南方发生低温雨雪冰冻的风险区划。王颖等(2019)从灾害成因角度选取评估指标，建立灾害危险性评估的气象指标体系，基于不同强度频率的评估思路构建综合危险指数，对中国低温雨雪冰冻灾害危险性进行了评估和区划。

以上研究主要针对的是全国大范围或南方某些省个别比较严重的低温雨雪过程或事件，且多为个例分析、历史比较或评估区划，而对湖北省区域性持续低温雨雪过程的研究较少。湖北省在开展第一次全国自然灾害综合风险普查工作时，需要针对湖北过去近70 a的区域性持续低温雨雪过程进行梳理，特别是在气候变暖背景下湖北省持续低温雨雪过程有何变化特征方面还尚待深入研究。为此，本文首先基于万素琴等(2008)对单站持续低温雨雪冰冻过程指数的构建思路，提出增加积雪作为灾害要素，并采用积雪深度和降雪日数来替代雨雪量、雨雪日数表征雨雪的强度和持续时间，用平均气温和低温日数表征低温的强度和持续时间，重新建立了湖北省单站持续低温雨雪过程评估指数模型；然后，定义区域性持续低温雨雪过程，并将其应用在区域性持续低温雨雪过程评估指数模型的构建中；最后，对湖北省单站及区域性低温雨雪过程的发生时间、频次、强度等时空分布和变化特征等进行初步分析，以期为今后湖北冬季持续低温雨雪过程监测评估以及雪灾普查工作提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料为：(1) 湖北省76个国家级地面气象站自建站开始至2020年的逐日平均气温、积雪深度和降雪观测数据，来源于湖北省气象信息保障中心；(2) 1950年代至2020年湖北省气象灾情资料，来源于《中国气象灾害大典·湖北卷》以及武汉区域气候中心编制的1971—2020年历年的《湖北省气候影响评价》等。需要说明的是，本文的研究时段是指当年11月至次年3月，即除了包括冬季(当年12月至次年2月)，还考虑到了11月、3月分别是秋冬、冬春的转换时段，11月常出现强寒潮，3月易发生倒春寒天气，天气气候突变的初期是气象灾害影响最为关键的时期之一(李兰等，2011)。此外，由于全省各站建站时间不一，直至1975年全省才建起76站，所以计算湖北省单站持续低温雨雪过程，以及基于单站分析区域性持续低温雨雪过程发生区域的空间分布用到的是1975—2020年的数据。而1950年代至1970年代灾情资料中均记载有典型的区域性持续低温雨雪过程，为了评估湖北省建站以来的区域性持续低温雨雪过程的历史排位，参照1.2.1中区域性持续低温雨雪过程的定义，对1951—2020年区域性持续低温雨雪过程进行分析。

1.2 研究方法

1.2.1 持续低温雨雪过程的定义

低温雨雪是湖北省冬季多发的一种综合性重大灾害性天气，其过程具有影响时间长、范围广、灾情重、直接灾害和衍生灾害并存的特点，单站持续性低温雨雪过程，包含雨雪和低温两个含义。雨雪后若气温持续保持在0 ℃或以下，积雪难以融化，灾害影响会继续存在，并且持续较长时间的降雪、深厚积雪、低温会对社会产生严重危害(陈正洪，2010)，所以雨雪过程是指出现了连续5 d以上降雪或积雪的过程。而低温

过程的判别，关键在于判断标准中采用的是日平均气温还是日最低气温及其阈值的确定(王凌等，2008；叶成志等，2009；彭贵芬等，2010；王海军等，2010)。

定义连续5 d以上降雪或积雪过程的同期或前后期也伴随出现连续低温且连续雨雪或积雪过程和连续低温过程有至少1 d的重叠，为一次持续低温雨雪过程。将连续雨雪和连续低温两个开始日最早的日期，至两个结束日最晚的日期间的时间段，定义为某一测站的一次持续低温雨雪过程。其中，持续雨雪天气定义为：连续5 d及以上的降雪或积雪天气(允许期间有1 d间歇)，连续7 d及以上的降雪或积雪天气(允许期间有2 d间歇，但间歇日不连续)，连续10 d及以上的降雪或积雪天气(允许期间有3 d间歇，但间歇日不连续)。低温过程的定义为连续多日日平均气温≤0 ℃的过程。

对单站持续低温雨雪过程的定义参考了万素琴等(2008)的定义并进行了两处修订：(1) 增加持续低温雨雪过程的灾害情景(即由降雪修订为同时考虑降雪或积雪)。(2) 采用物理意义清晰的0 ℃作为低温的阈值，定义低温过程为连续多日日平均气温≤0 ℃的过程。物理学上水的凝固点是0 ℃，这对降雪或积雪有很好的指示意义。

对区域性持续低温雨雪过程定义为湖北省单日内至少有1/4的国家气象观测站出现单站持续低温雨雪天气则为区域性持续低温雨雪日。出现5个或5个以上连续区域性持续低温雨雪日，则为一次区域性持续低温雨雪过程；区域性持续低温雨雪过程起止日的判定为：区域性持续低温雨雪过程的开始日为满足区域性持续低温雨雪过程条件的首个区域性持续低温雨雪日，区域性持续低温雨雪过程的结束日为满足区域性持续低温雨雪过程条件的最后一个区域性持续低温雨雪日。

1.2.2 持续低温雨雪过程综合指数模型的构建

为了进一步还原灾害情景以及降低雨雪量中降雨对持续低温雨雪过程评估带来的干扰，本文在梳理湖北过去近70 a的区域性持续低温雨雪过程时，先从单站持续低温雨雪过程着手，构建单站持续低温雨雪过程综合指数模型。

(1) 单站持续低温雨雪过程综合指数的构建。湖北省雨雪天气往往交替出现，降水量的气象站观测资料，难以做到降雨和降雪的区分，而同样降水量的条件下，降雪和降雨产生的危害是不一样的，不对二者进行区分，会导致夸大降雨弱化降雪引起的灾害严重性；其次，由于冬季降水存在多相态(雨、雪等)，故本文选取表达积雪累积量特征的积雪深度和降雪天气(包括雨夹雪)的日数来表征雨雪过程强度，以降低雨雪量中雨量对构建持续低温雨雪指数带来的不确定影响。

对过程的平均气温、平均气温≤0 ℃的日数、最低气温等低温过程的指标进行相关性分析可知，过程平均气温与过程最低气温有高度的相关性，在a=0.05显著性水平上相关系数达到0.91，考虑到选取指标需要满足独立性的要求，低温部分的评估指标，采用的是过程中低温期间的平均温度以及过程中的低温日数。

本文采用持续低温雨雪过程降雪日数dx (记为d_x)及期间最大积雪深度px (记为p_x)作为评估雨雪部分的两项指标，选取日平均气温≤0 ℃的低温日数dt (记为d_t)及低温期间的平均气温tm (记为t_m)两个要素作为评估低温部分的两项指标，共4个因子作为某一测站持续低温雨雪过程综合评估指标因子。采用等权重方案求和计算综合指数。单站持续低温雨雪过程综合指数用Z_i表示，计算公式如下

$$Z_i=\frac{d_x(i)}{d_x(0)}+\frac{p_x(i)}{p_x(0)}+\frac{d_t(i)}{d_t(0)}+\frac{t_m(i)}{t_m(0)} \tag{1}$$

其中

$$d_x(0)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_x(i) \tag{2}$$

$$p_x(0)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}p_x(i) \tag{3}$$

$$d_t(0)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}d_t(i) \tag{4}$$

$$t_m(0)=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_m(i) \tag{5}$$

式(1)—(5)中，$Z(i)$为单站持续低温雨雪过程综合指数，$d_x(i)$为最长连续降雪日数，$p_x(i)$为期间最大积雪深度，$d_t(i)$为最长连续低温日数，$t_m(i)$为低温期间的平均气温，$d_x(0)$为最长连续降雪日数的平均值；$p_x(0)$为最大积雪深度的平均值；$d_t(0)$为最长连续低温日数的平均值；$t_m(0)$为低温期间的平均气温的平均值，i为年份。平均值是指1991—2020年间求平均，n为30。

(2)区域性持续低温雨雪过程综合指数模型构建。由于单站的持续低温雨雪综合指数已经评估了单站雨雪、低温的综合强度，所以区域性持续低温雨雪过程综合指数模型依据过程影响范围、过程持续时间和过程平均强度三因素建模。区域性持续低温雨雪过程持续时间即区域性持续低温雨雪过程从开始日至结束日的总日数D。区域性持续低温雨雪过程影响范围为区域性持续低温雨雪过程中持续低温雨雪站数比A_a，即过程中出现的持续低温雨雪站数与湖北省国家气象观测站总站数之比。区域性持续低温雨雪过程平均低温雨雪强度为I_a。区域性持续低温雨雪过程综合指数为Z。其数学表达式如下

$$A_a=\frac{M}{N} \tag{6}$$

$$I_a = \frac{\sum_{i=1}^{M} Z(i)}{M} \tag{7}$$

$$Z = I_a \times A_a^{0.5} \times D^{0.5} \tag{8}$$

其中，N为设定区域当年国家气象观测站总站数，M为区域内过程中出现的持续低温雨雪站数。$Z(i)$为区域内过程中第i个站的持续低温雨雪过程综合指数。

区域性持续低温雨雪过程综合强度等级依据区域性持续低温雨雪过程综合指数Z确定。计算设定区域气候标准期(1991—2020年)内区域性持续低温雨雪过程综合指数值，采用百分位数法，以50%、80%和95%百分位对应的百分位数为等级阈值，将区域性持续低温雨雪过程综合强度划分为一般、较强、强和特强四个等级(万素琴等，2008)。

2 湖北省持续低温雨雪过程评估结果与分析

2.1 单站持续低温雨雪过程的评估与分析

根据单站持续低温雨雪过程的定义，由于单站建站时间不统一，直至1975年全省才建成76站，故对1975—2020年湖北省单站持续低温雨雪过程进行了梳理，在这段时间内，湖北共出现2 353次单站低温雨雪过程，下面对这些过程及其发生时间、区域等方面进行分析，并初步探讨了造成持续低温雨雪过程分布差异的海拔高度和地形的影响。

2.1.1 发生时间及变化特征

湖北省单站持续低温雨雪过程主要发生在12月、1月和2月，其中又以1月发生次数最多，占53.2%，其次是2月，占比26.5%，12月，占比19.7%。另外，在11月出现了14站次(表1)，发生地点主要集中在神农架、利川、保康、五峰等鄂西山区。从单站低温雨雪过程逐年频次变化图来看(表1)，1975年以来，低温雨雪过程发生最多的是1980年133站次。逐年频次的年际变化呈阶段性变化特征，1975—1990年是一个较长的偏多的阶段，1991—2005年、2006—2020年转为偏少，并且偏少程度在增加，2006—2020年整体均值较1975—1990年的减少20站次。1975—2020年单站持续低温雨雪过程发生频次呈现一定程度的下降趋势，变化趋势为−8.7次·(10 a)$^{-1}$，相关系数通过0.001的显著性水平。从年代变化来看，1980—1989年是年均单站过程发生最多的年代，达74次，其次是1970—1979年60次，2010—2019年减少到只有40次，较频次最多的1980—1989年减少近一半。分析逐年低温雨雪过程发生频次与冬季平均气温距平关系可知，两者变化呈现很好的反相关关系，相关系数为−0.69，通过了0.001的显著性水平。1970—1989年，湖北省冬季属于偏冷状态，相应发生低温雨雪过程次数较多，而进入90年代，冬季温度有所快速回升，1991—2020年出现了15年暖冬，在暖冬出现的年份，发生低温雨雪过程的次数明显偏少，其中2016年未发生持续低温雨雪过程。

表1　1975—2000年湖北省不同月份单站持续性低温雨雪过程的出现次数和占比情况

Table 1 The frequency and proportion of different month of station-based continuous low temperature rain and snow process in Hubei Province during 1975–2000

月份	单站过程站次	占总站次比例/%
11	14	0.6
12	463	19.7
1	1 252	53.2
2	624	26.5
3	0	0

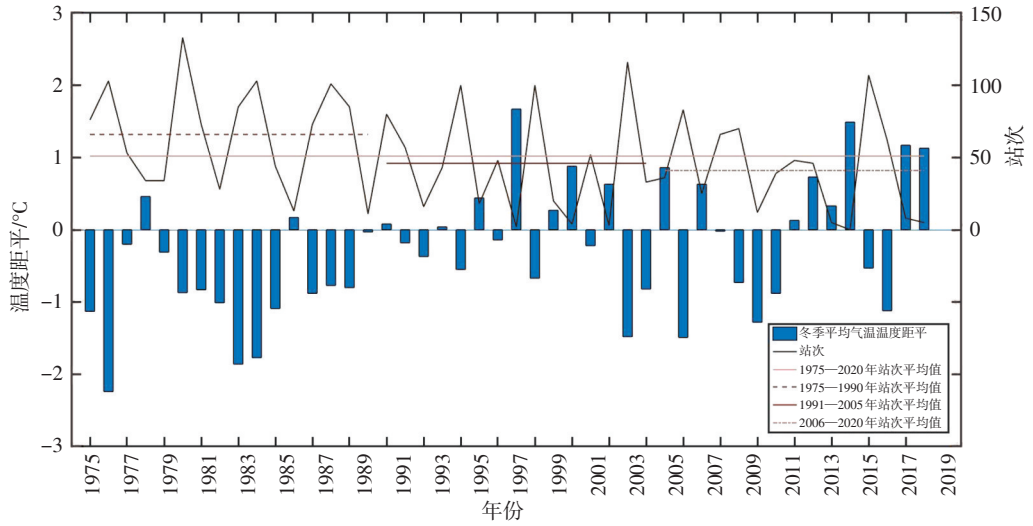


图1 1975—2020年湖北省单站持续低温雨雪过程的发生次数和冬季平均气温距平

Fig. 1 Interannual variation of station-based continuous low temperature rain and snow progress and winter average temperature anomaly in Hubei Province during 1975–2020

由上可知，气候变暖与冬季持续低温雨雪过程发生的频次减少密切相关。

2.1.2 与海拔高度的关系

发生单站持续低温雨雪过程最多的站是神农架、利川、五峰、咸丰等4个站，发生频次都是50次以上，最多的是神农架站，共发生了105次。

为了分析持续低温雨雪过程与海拔的关系，统计了不同海拔高度下单站持续性低温雨雪过程发生次数以及对应站点的分布情况(表2)，由此可知，随着海拔升高，单站平均发生低温雨雪过程次数也在增加。湖北省76个站点中有7个站点在500 m以上，主要分布在鄂西地区，1975—2020年共发生了369次持续低温雨雪过程，占湖北省单站持续低温雨雪过程的15.7%，其中500～1 000 m的单站平均发生次数为45，1 000 m以上的站为利川，其单站平均发生次数为99。海拔在100 m以下的，主要分布在江汉平原和鄂东地区，平均单站发生次数为26左右，100～500 m之间的站点，主要分布在鄂西地区，单站平均发生次数为32。

表2 1975—2020年湖北省不同海拔高度下单站持续性低温雨雪过程发生次数以及对应站点的分布

Table 2 The number of occurrences of station-based continuous low temperature rain and snow progresses at different altitudes in Hubei province and the distribution of corresponding stations during 1975-2020

海拔高度/m	总站数	发生过程次数	平均单站发生次数	发生过程次数占总次数百分比/%	不同区域过程发生站次				
					鄂西北	鄂东北	鄂西南	江汉平原	鄂东南
[20,50)	23	604	26	25.6	0	5	0	11	7
[50,100)	15	401	27	17.0	1	3	2	1	8
[100,200)	18	575	32	24.4	6	5	3	3	1
[200,500)	13	404	31	17.2	7	0	6	0	0
[500,1 000)	6	270	45	11.5	1	0	5	0	0
≥1 000	1	99	99	4.2	0	0	1	0	0

从图2可知，单站持续低温雨雪过程高发区位于鄂西高山、半高山地区，其中神农架(105次)，利川(99次)；而江汉平原的荆门、钟祥等地及鄂东地区的随州、大悟等地分布在鄂西山地与桐柏、大洪山相夹的冷空气南下通道内，容易形成持续低温雨雪天气过程。

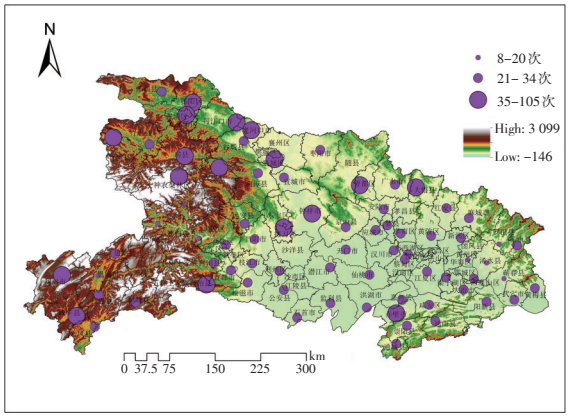


图2 1975—2020年湖北省单站持续低温雨雪过程频次分布(填色为地形高度，单位：m，下同)

Fig. 2 Frequency distribution of station-based low temperature rain and snow progress in Hubei province from 1975 to 2020 (color-filled shaded is the terrain, unit: m)

2.2 区域性持续低温雨雪过程评估与分析

2.2.1 区域性持续低温雨雪过程评估

根据区域性持续低温雨雪过程的定义，统计1951—2020年湖北省气象站的温度和降水资料可知，共出现了70次区域性持续低温雨雪过程。并参考湖北省地标《区域性暴雨过程综合强度评估》中区域性暴雨的过程综合强度的计算方法，进一步从过程影响范围、过程持续时间和过程平均强度三方面构建了区域性持续低温雨雪过程综合指数(Z)。为了评估湖北省建站以来的区域性持续低温雨雪过程的历史排位，并减少全省站点建站时间不统一对结果的影响，本文在分析区域性持续低温雨雪过程的时间分布时，研究时段是1951—2020年，分析区域性持续低温雨雪过程的发生区域的空间分布时，研究时段为1975—2020年。

根据湖北区域性持续低温雨雪过程的统计信息可知，Z值达到21.2以上的(强等级及以上)的过程共28次，其中特强11次，除了10年代，其他年代均有出现，以50年、60年代最多(3次)，其次是70年代(2次)，达到强等级的过程共9次，以50年代发生次数最多，达3次；进一步分析可知，50年代区域性持续低温雨雪过程的发生最为频繁而且强度也大，60年代和70年代虽然区域性持续低温雨雪过程的频次为10，不及80年代那么频繁(13次)，但是强等级及以上过程发生次数较80年代略多，进入90年代后，区域性持续低温雨雪过程次数发生进一步减少，但过程的极端性增加，近70年来Z值的次高值出现在2008年，这表明在气候变暖的背景下，会出现极端冷事件。

按照综合强度值由大到小的顺序，对其中的最强10个区域性持续低温雨雪过程进行正排序，给出各过程实况以及综合强度评估值(等级)(表3)。

由表可知，特强等级排名前5的过程(1954、2008、1969、1977和1984年)中，有3次过程持续时间长达半

表3 1951—2020年湖北省强度前10的区域性雨雪过程总结

Table 3 The ranking of top 10 regional continuous low temperature rain and snow process in Hubei province from 1951 to 2020

序号	开始时间(年/月/日)	结束时间(年/月/日)	持续天数/d	站数比	平均低温雨雪强度	当年国家站站数/个	综合强度指数
1	1954/12/24	1955/1/18	26	1	26.22	11	133.72
2	2008/1/12	2008/2/5	25	1	16.73	76	83.63
3	1969/1/27	1969/2/8	13	0.93	16.64	73	57.91
4	1977/1/25	1977/2/4	11	0.99	17.25	76	56.82
5	1984/1/15	1984/1/31	17	1	12.43	76	51.25
6	1972/1/31	1972/2/12	13	1	13.5	74	48.69
7	1964/2/5	1964/2/25	21	0.99	10.2	72	46.44
8	1957/1/29	1957/2/13	16	1	11.53	31	46.14
9	1956/1/19	1956/1/26	8	0.93	16.48	14	44.92
10	1966/12/21	1967/1/6	17	0.86	10.72	73	41.04

个月以上，影响区域覆盖全省大部，平均单站持续低温雨雪过程综合强度达15以上的有4次，查阅《中国气象灾害大典·湖北卷》以及历年湖北气候影响评价中的典型过程的可知，其中最严重的是1954年的过程，《中国气象灾害大典·湖北卷》(姜海如，2007)中提到，该过程是由于蒙古国的冷高压不断分裂小股冷空气经华北平原南下，冷锋南移到华南呈准静止状态，锋后有大片雨雪区，此次过程降温虽缓慢，但过程降温幅度大。持续的严寒造成全省农作物冻害严重，油菜冻死近半。全省冻死耕牛11万余头，约占灾前耕牛总数的1/4。阳新、广济、郧县、松滋等地柑橘大部分冻死。汉水出现了二十世纪少见的结冰，天门县境内汉江可行板车，汉川、安陆境内府河封冻，洪湖县近2万农户被冰雪围困。直到1955年元月21日，汉水冰冻才全部解除，汉江航运恢复。其次是2008年，据陈正洪等(2008)，2008年过程造成湖北省受灾人口2 279.8万人，因灾直接死亡13人，伤病22 869人，转移住危房群众和倒房灾民21.65万人，饮水困难320.2万人，铁路、公路累计滞留旅客2.625×10^5人次；农作物受灾1.6285×10^6 hm^2，其中绝收2.157×10^5 hm^2，直接经济损失超过110亿元，湖北省出现了自1954/1955年冬季以来最严重的低温雨雪冰冻灾害。排在第3、4位的是1969年和1977年元月下旬的两次的过程，从《中国气象灾害大典·湖北卷》(姜海如，2007)可知，其特点是来势凶猛，降温剧烈，最低温异常低。1969年元月下旬，除地处鄂西南河谷的恩施地区没有出现低于−9 ℃(柑橘毁灭性冻害的临界温度)的低温外，其它大部分地区在1月26日—2月2日连续6天日平均气温在−3~−8 ℃。1月31日全省极端最低气温为−10~−17.3 ℃。1977年1月下旬，湖北省大部地区下了10~20 mm的大雪。由于气温低，积雪不融化，不少地方积雪深达1尺左右。最低气温降到−10~−18 ℃，鄂西南河谷也出现了低于−9 ℃的低温。这次低温严重，使蔬菜、柑橘和油菜等越冬作物受到非常严重的冻害，造成重大的经济损失，仅武汉市就冻坏了几万吨蔬菜，造成市场供应紧张。宜昌地区的柑橘，又一次遭到毁灭性冻害，柑橘产量大减，由大冻前的31.1万担，陡降到1978年的5.5万担，减产八成以上。此后，经历了5个减产年，到1982年才恢复到大冻前的产量水平。另外，排在第5位的过程在《中国气象灾害大典·湖北卷》(姜海如，2007)中也可查到相关灾情损失数据，由于缺乏定量化综合灾情评估指标，尚无法进行灾损排位，但评估的前5强过程强度等级基本反映了其实际综合灾情，评估结果与实际灾情基本一致。第6—10位过程在历年的《湖北省气候影响评价》、万素琴等(2008)以及《湖北天气预报手册》的相关描述或结论中也有所体现。实际灾情数据关联分析表明，本文基于气象要素的区域性持续低温雨雪过程综合指数能反映承灾体实际的致灾损失，可用于灾后损失的预估。

2.2.2 发生时间与变化特征

在研究时段内(11月—次年3月)，区域性持续低温雨雪过程最早发生的是时段是12月上旬初(1954年)，最晚时段是2月下旬末(1988年)，有34次过程发生在1月，接近总次数的一半，发生始于12月、2月的分别有17次、19次。综上可知，湖北区域性持续低温雨雪过程主要发生时间是1月、2月和12月。

统计对比各年代发生区域性持续低温雨雪过程的频次(表4)发现，20世纪50年代发生频次最多，共发生了15次，占总次数的21.8%，其次是80年代13次，而90年代、00年代是发生次数最少的年代，10年代次之；从年代际变化特征来看，经历了一个由多到少，80年代达到次峰值后，进入90年代突然变少的变化趋势。这与单站持续低温雨雪过程变化趋势大体一致，同样与湖北冬季平均气温的气候变化特征相符，区域性持

续低温雨雪过程发生最多的年代都是冬季偏冷的年代，而冬季偏暖的年代发生区域持续低温雨雪过程减少。

表4 1950–2010年湖北省区域性持续低温雨雪过程频次年代际变化

Table 4 Decadal variation of regional continuous low temperature rain and snow progress in Hubei Province during 1950–2010

年代	频次	占比/%
1950s	15	11.8
1960s	10	15.5
1970s	10	15.5
1980s	13	21.8
1990s	7	11.8
2000s	7	13.6
2010s	8	10.0

2.2.3 发生区域

将1975—2020年每次区域性持续低温雨雪过程中涉及的站点进行叠加统计，从而得到全省区域性持续低温雨雪过程的易发区(图3)。由图3可知，近45 a湖北省区域性持续低温雨雪过程的易发区集中在鄂西高山或半高山地区、汉江河谷一带、江汉平原荆州一带、鄂东南南部低山平原地区以及鄂东北山脉的缺口处。对比单站过程的高发区，可以发现，神农架、利川仍然是区域过程中涉及最多的站点。不同的是，区域性持续低温雨雪过程的易发区较单站过程往南影响到了荆州地区一带。这是因为冷空气由汉江中游河谷进入江汉平原和洞庭湖平原后，行速减慢，在江汉平原和洞庭湖平原停留时间较长，易于与暖湿气流交绥形成大范围的持续低温雨雪过程。

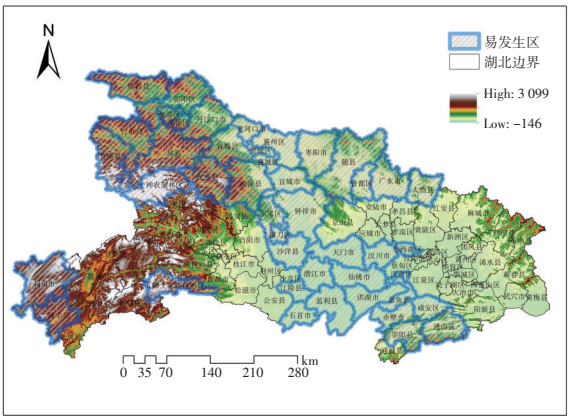


图3 1975—2020年湖北省区域性持续低温雨雪过程易发区

Fig. 3 Areas prone of regional continous low temperature rain and snow progress in Hubei province from 1975 to 2020

3 结论与讨论

本文在万素琴等(2008)对湖北持续性低温雨雪冰冻过程定义的基础上，考虑到雨雪过后气温持续低于0 ℃，积雪难以融化，灾害的影响仍持续，因此在单站持续低温雨雪过程的定义中做了两处修订，即提出增加积雪作为灾害情景，并将0 ℃作为低温的阈值，修改了单站持续低温雨雪过程的定义。其次，为了降低采用雨雪量中雨量对构建持续低温雨雪指数带来的量级跳跃的影响，以及考虑到选取指标需要满足独立性的要求，做了第三步修订，即采用过程最大积雪深度、过程降雪日数、过程低温日数、过程平均气温重新搭建了持续低温雨雪指数。最后，将修订后的单站持续低温雨雪过程指数应用于湖北省单站和区域性持续低温雨雪过程评估。得到以下主要结论：

(1) 计算得到湖北省最严重的5次区域性持续低温雨雪过程分别出现在1954、1969、1977、1984和2008年，最严重的是1954年12月24日–1955年1月18日的过程，其次是2008年1月12日–2008年2月5日的过程。

(2) 高程为20～50 m的单站平均发生低温雨雪过程次数为26，随着海拔升高，单站平均发生低温雨雪过程次数也在增加。500～1 000 m的单站平均发生次数为45，1 000 m以上的站为利川，其单站平均发生次数达到99，分别较高程为20～50 m的分别增加了73%、近3倍。

(3) 湖北省单站和区域性持续低温雨雪过程均在20世纪80年代前发生次数较多，从90年代后属于减少的阶段，但其强度更趋极端。

(4) 近45 a湖北省区域性持续低温雨雪过程易发区位于鄂西高山或半高山区、汉江河谷一带、江汉平原荆州一带、鄂东南南部低山平原地区以及鄂东北大洪山脉缺口处，对比近45 a来单站过程的高发区，神农架和利川仍是出现最多(36次)的站，且除区域性持续低温雨雪过程的易发区南延至荆州地区外，其他地区分布大致相同。

本文对湖北过去近70 a的区域性持续低温雨雪过程进行了客观识别，并初步分析了湖北省单站及区域性低温雨雪过程的发生时间、频次、强度等的时空变化特征，以期为冬季湖北的持续低温雨雪过程监测评估以及湖北省雪灾普查工作提供参考依据。但对于不同行业，持续低温雨雪灾害的致灾机理并不一样，所以致灾因子的选取是不同的。下一步工作将结合农业或交通行业持续低温雨雪灾害的灾情数据，开展持续低温雨雪灾害的风险评估工作，进一步揭示针对行业的持续低温雨雪灾害的风险特征变化。

参考文献(References)：

陈正洪,史瑞琴,李兰.2008.湖北省2008年初低温雨雪冰冻灾害特点及影响分析[J].长江流域资源与环境,17(4):639–644. Chen Z H, Shi R

Q, Li L. 2008. Analysis on the main properties of the low temperature, raining and snowing icing disaster and its effect in Hubei in early 2008 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,17(4): 639–639 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–8227.2008.04.026

陈正洪.2010.社会对极端冰雪灾害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. 2010. 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:10.3969/j.issn.1008–3456.2010.03.024

姜海如.2007.中国气象灾害大典(湖北卷)[M].北京:气象出版社. Jiang H R. 2007. China meteorological disaster (Hubei volume) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

李灿,张端禹,冯明,等.2009.南方极端低温雨雪冰冻过程天气学特征分析[J].暴雨灾害,28(4):321–327. Li C, Zhang D Y, Feng M, et al. 2009. Analysis of synoptic characteristic of extremely low temperature and snow–ice weather in South China [J]. Torrential Rain and Disasters,28 (4):35–41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2009.04.006

李登文,杨静,吴兴洋.2011.2008年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰气象条件分析[J].气象,37(2):161–169. Li D W, Yang J, Wu X Y. 2011. Discussion on genesis of wire icing in Guizhou during the freezing rain and snow storm in January 2008 [J]. Meteorological Monthly,37(2): 161–169 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn. 1000–0526.2011.02.005

李兰,陈正洪,刘敏,等.2011. 2008年低温雨雪冰冻对武汉城市公共交通的影响评估[J].长江流域资源与环境,20(11):1400–1404. Li L, Chen Z H, Liu M, et al. 2011. Evaluation of effect of sleeting and freezing process with low temperature on public traffic of Wuhan city in 2008 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,20(11): 1400–1404 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–8227.2011.11.020

刘红武,李振,陈龙,等.2020.湖南一次罕见低温雨雪冰冻天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,14(2):18–26. Liu H W, Li Z, Chen L, et al. 2020. Comprehensive analysis of a rare consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,14(2):18–26 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2020.02.003

毛淑君,李栋梁.2015.基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估[J].冰川冻土,37(1):14–26. Mao S J, Li D L. 2015. Comprehensive assessment of low temperature, snow and freezing weather in southern China based on meteorological elements [J]. Journal of Glaciology and Gcocryology,37(1):14–26 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0240. 2015.0002.

彭贵芬,段旭,舒康宁.2010.云南2008年冰冻灾害评估[J].气象,36(10): 72–77. Peng G F, Duan X, Shu K N. 2010. An estimate of the 2008 freezing disaster inYunnan [J]. Meteorological Monthly,36(10):72–77 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000–0526.2010.10.012

王颖,王晓云,江志红,等.2013.中国低温雨雪冰冻灾害危险性评估与区划[J].气象,39(5):585–591. Wang Y, Wang X Y, Jiang Z H, et al. 2013. Assessment and zoning of low temperature, rain/snow and freezing disasters in China [J]. Meteorological Monthly,39(5):585–591 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2013.05.006

王凌,高歌,张强,等.2008. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析I.气候特征与影响评估[J].气象,34(4):95–100. Wang L, Gao G, Zhang Q, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice snow and frozen disasters in south China during January 2008: I. climatic features and its impact [J]. Meteorological Monthly,34(4):95–100 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2008.04.012

王海军,覃军,张峻.2010.中国南方7省冰冻天气时空分布规律研究[J].长江流域资源与环境,19(7):839–846. Wang H J, Qin J, Zhang J. 2010. On spatial temporal distribution of the freezing weather in Southern China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,19(7): 839–846 (in Chinese). doi:10. 3969/j.issn.1004–8227.2010.07.019

湖北省气象局.1988.湖北天气预报手册[M].武汉:湖北省气象局. HuBei Meteorological Bureau. 1988. Hubei weather forecast handbook [M]. Wuhan:Hubei Meteorological Bureau (in Chinese)

汪丽,高洁,曾波.2016.南方地区低温雨雪事件的时空分布和成因研究[J].高原山地气象研究,36(3):39–43. Wang L, Gao J, Ceng B. 2016. Temporal and spatial distribution of Southern snow events and causes study [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,36(3):39–43 (in Chinese). doi: 10.3969/j.issn.1674–2184.2016.03.007

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

徐雅雯,吴可可,朱丽蓉,等.2010.中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J].生态环境学报,19(6):1485–1494. Xu Y W, Wu K K, Zhu L R, et al. 2010. A review of freezing rain and snow impacts on forests in southern China [J]. Ecology and Environment,19(6):1485–1494 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–5906.2010.06.040

薛建辉,胡海波.2008.冰雪灾害对森林生态系统的影响与减灾对策[J].林业科学,44(4):1–2. Xue J H, Hu H B. 2008. The impact of ice and snow disasters on forest ecosystems and disaster reduction strategiesa [J]. Scientia Silvae Sinicae,44(4):1–2 (in Chinese). doi:10.11707/j.1001–7488.20080401

杨锋伟,鲁绍伟,王兵.2008. 南方雨雪冰冻灾害受损森林生态系统生态服务功能价值评估[J].林业科学,44(11):101–110. Yang F W, Lu S W, Wang B, et al. 2008. Value estimation of service function of forest ecosystem damaged by frozen rain and snow in the South China [J]. Scientia Silvae Sinicae,44(11):101–111 (in Chinese). doi:10.11707/j.1001–7488.20081120

叶成志,吴贤云,黄小玉.2009.湖南省历史罕见的一次低温雨雪冰冻灾害天气分析[J].气象学报,67(3):488–500. Ye C Z, Wu X Y, Huang X Y. 2009. Synoptic analysis of the unprecedented severe event of the consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(3):488–500 (in Chinese). doi:10.3321/j.issn:0577–6619.2009.03.016

Qian X, Miao Q, Zhai P, et al. 2014. Cold–wet spells in mainland China during 1951–2011 [J]. Natural Hazards,74:931–946. doi:10.1007/s11069–014–1227–z

Zhang H, Qin J, Li Y. 2011. Climatic background of cold and wet winter in southern China:Part I.Observational analysis [J]. Climate Dynamics,37: 2335–2354.doi:10.1007/s00382–011–1022–4

（责任编辑　闵爱荣）