

低温雨雪冰冻极端气候事件的多指标综合评估技术

万素琴¹ 周月华¹ 李 兰¹ 史瑞琴¹ 郭广芬¹ 陈 波²

(1. 武汉区域气候中心, 430074; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所)

提 要: 评估极端气候事件, 往往用某一项极端气候要素进行分析评估, 如暴雨量、极端最高(最低)气温等。2008 年初出现的持续低温雨雪冰冻过程, 具有雨雪量大、持续雨雪时间长、积雪深、积雪时间长、低温持续时间长、但极端最低气温不低的特点, 用其中任一因子评估定位该过程, 都不能全面反映该过程的综合影响特征。提出低温雨雪过程综合指数的概念, 用最长连续雨雪日数及期间雨雪总量作为评估雨雪部分的两项指标, 日平均气温 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 的连续日数、过程平均气温和过程极端最低气温三个要素作为评估低温部分的三项指标, 将五个指标分别无量纲化后, 采用等权重技术方案建立综合指数计算模型。计算湖北 10 个代表站建站以来逐年最长低温雨雪冰冻过程综合指数, 分析 2008 年低温雨雪冰冻过程综合指数历史排位、历史重现期, 从而对该过程进行评估定位, 结果比较客观, 方法简单可行, 便于推广。

关键词: 低温雨雪冰冻 多指标 综合评估技术

A Multi-index Synthetic Assessment Method for Extreme Climate Events of Sleet and Freezing with Low Temperature

Wan Suqin¹ Zhou Yuehua¹ Li Lan¹ Shi Ruiqin¹ Guo Guangfen¹ Chen Bo²

(1. Wuhan Regional Climate Center 430074; 2. Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA)

Abstract: Extreme climate elements such as torrential rain, extreme high temperature, extremely low temperature and so on are always used to analyze and evaluate an extreme climate event. There was a continuous sleet and freezing process with low-temperature in the beginning of 2008. The process had the characteristics of large and sustained precipitation and snowfall, deep and long-time snow accumulation, long time in daily low-temperature with not so—low extreme low temperature. Therefore, it wasn't objective and accurate to choose any single one of these elements to analyze and evaluate this process. As a result, a comprehensive index of sleet process

was suggested, which takes largest number of days of rain and snow, total precipitation and snowfall as two indices to evaluate rain and snow, and takes largest number of days of continuous low-temperature, average temperature and lowest temperature as three indices to estimate low temperature. Meanwhile, in order to build a comprehensive index calculation model, these five indices were changed into dimensionless ones, and then summed with equal weight. The model was used to calculate the comprehensive index of the longest continuous sleeting and freezing process with low-temperature of ten meteorological stations in Hubei province. By comparing with the historical rank and recurrence period of the comprehensive index, the process in 2008 was evaluated. The result showed that the model and method was objective, easy to be used and extended.

Key Words: sleeting and freezing process with low-temperature multi-index synthetic assessment method

引 言

在全球气候变暖背景下,自 1980 年代以来,湖北省冬季寒冷事件明显减少。2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日,湖北省出现了大范围持续低温、雨雪、冰冻天气气候事件,由于雨雪量大、积雪时间长、低温持续时间长,对农业、交通、电力、通讯以及日常生活造成了严重影响,引起社会广泛地关注。1 月 15 日后,社会上众说纷纭,有说是近 15 年来最为严重的低温雨雪过程、也有说是近 23 年来、甚至是近 30 年来最为严重的低温雨雪过程。随着灾情不断加重和升级,政府部门、社会媒体、公众及受影响的各行各业都迫切希望气象部门能对此低温雨雪冰冻灾害滚动给出客观的评估和定位。怎样评估这次罕见的低温雨雪冰冻天气,并给出客观准确的定位呢?在以往的工作中,评估某一极端气候事件,往往用某一个极端气候要素进行历史分析和评估定位^[1-2],如在评估一次低温(高温)极端气候事件往往用过程极端最低(高温)气温,评估一次暴雨(雪)极端气候事件常用最大日降水量(降雪量或积雪深度)等。2008 年 1 月 11 日至 2 月 3 日出现的持续低温雨雪冰

冻极端气候事件,具有雨雪量大、持续雨雪时间长、积雪深、积雪时间长、低温持续时间长、但极端最低气温不是很低的特点,用其中任一因子进行评估和定位,都不能全面反映该过程的历史地位和综合影响。例如仅用极端最低气温分析,评估结果是 1991 年以来最严重的一次过程,7~10 年一遇,但这次过程所造成的灾害和影响已远远大于 1991 年;若用持续雨雪日数分析,此过程严重程度已大大超过 1954 年,达到百年以上一遇,而事实上此过程的低温程度和冻害程度要明显轻于 1954 年、1977 年等。王凌、王遵娅等人在对 2008 年初低温雨雪冰冻过程分析时,分别用过程气温、降雪量、连续低温日数、连续降水日数、连续冰冻日数分析历史排位或多年一遇^[3-4]。本文提出低温雨雪冰冻过程综合指数的概念,考虑采用多因子综合分析,建立综合指数计算模型^[5]。用低温雨雪冰冻过程综合指数对 2008 年低温雨雪冰冻过程综合指数进行历史排位、历史重现期分析,避免了用不同单要素统计分析,其历史排位、历史重现期不同,总体定位仍需主观综合的状况。结果比较客观,方法简单,便于业务应用,类似的综合性气象灾害分析评估可借鉴。

1 持续低温雨雪冰冻过程综合指数计算模型

1.1 持续低温雨雪冰冻过程的界定

持续低温雨雪冰冻过程是指在一次连续 5 日以上雨雪过程的同期或前后期还出现连续多日低温的天气过程,且连续雨雪过程和连续低温过程有至少 1 日重叠(否则可能为两个不同过程)。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的这段时间,定义为一次持续低温雨雪冰冻过程。

对于持续雨雪天气,给出如下定义:

连续 5 天及以上的雨雪天气(允许期间有 1 天间歇)

连续 7 天及以上的雨雪天气(允许期间有 2 天间歇)

连续 10 天及以上的雨雪天气(允许期间有 3 天间歇)

根据以上定义,先统计出每年最长的连续雨雪过程,再将开始日 t_1 前推 10 天,将结束日 t_2 后推 10 天,即在 $(t_1 - 10)$ 日到 $(t_2 + 10)$ 日选出连续低温时段,从连续雨雪或连续低温开始日中最早的日期,到两个结束日中最晚的日期为一次持续雨雪低温冰冻过程。

1.2 低温雨雪过程综合评估指标因子的选取

能表征雨雪程度的因子有总雨雪量、持续雨雪时间、积雪深度、积雪时间等,表征低温程度的因子有连续低温日数、过程平均气温和过程极端最低气温等。选取因子一要考虑各自有代表性,二要考虑因子之间有独立性(即因子之间相关性不宜太高),经过相关分析,用连续雨雪日数(d_x)及期间雨雪总量(p_x)作为评估雨雪部分的两项指标,用日平均气温 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ 的连续日数(d_i)及期间的平均气温(t_m)和过程极端最低气温(t_{\min})作为评估低温部分的三项指标,共 5 个因子为持

续低温雨雪冰冻过程综合评估指标。

1.3 评估指标的无量纲化处理

由于 5 个指标量纲不同,数据的可比性差。为消除不同计量单位的影响,将 5 个指标因子无量纲化,使数据趋于稳定。方法如下。

设 5 个指标因子分别为:

$$y_i = \{d_{xi}, p_{xi}, d_{ti}, t_{mi}, t_{mini}\} \\ i = 1, 2, 3, \dots, n, \text{为年份。}$$

首先计算各项指标的平均值:

$$y_0 = \{d_{x0}, p_{x0}, d_{t0}, t_{m0}, t_{min0}\}$$

其中

$$d_{x0} = \frac{1}{n} \sum_1^n d_{xi}, p_{x0} = \frac{1}{n} \sum_1^n p_{xi}, \\ d_{t0} = \frac{1}{n} \sum_1^n d_{ti}, t_{m0} = \frac{1}{n} \sum_1^n t_{mi}, \\ t_{min0} = \frac{1}{n} \sum_1^n t_{mini}$$

则无量纲化后指标值为:

$$k_i = \left\{ \frac{d_{xi}}{d_{x0}}, \frac{p_{xi}}{p_{x0}}, \frac{d_{ti}}{d_{t0}}, \frac{t_{mi}}{t_{m0}}, \frac{t_{mini}}{t_{min0}} \right\} \\ i = 1, 2, 3, \dots, n, \text{为年份}$$

经过无量纲化处理,原始数据均转换为无量纲化指标评估值,即各指标值都处于同一个数量级别上,使所有指标对评估方案的作用力同趋化,可以直接进行算术或加权平均,进行综合评估分析。

1.4 低温雨雪冰冻过程综合指数计算模型

采用等权重方案求和计算综合指数。持续低温雨雪过程综合指数用 Z_i 表示,计算模型如下:

$$Z_i = \frac{d_{xi}}{d_{x0}} + \frac{p_{xi}}{p_{x0}} + \frac{d_{ti}}{d_{t0}} + \frac{t_{mi}}{t_{m0}} + \frac{t_{mini}}{t_{min0}} \quad (1)$$

其中 i 为年份

可以看出,当连续雨雪日数 d_x 越长,期间雨雪总量 p_x 越大,日平均气温 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ 的连续日数越长,期间的平均气温越低,过程极

端最低气温越低,即无量纲化后各项指标值越大,综合指数 Z_i 越大,持续低温雨雪过程越严重。

2 综合指数的应用

2.1 2008 年低温雨雪冰冻综合指数及与 1954 年比较

选取湖北省 10 个代表站,按公式(1)计算 2008 年低温雨雪冰冻过程综合指数,见表 1。结果表明,10 站中有 6 个站 2008 年低温雨雪冰冻综合指数为历史第二,仅次于 1954

表 1 全省 10 个代表站低温雨雪综合指数

站名	指数最大值		2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日	
	出现年份	最大值	指数	排名
武汉	1954 年	15.32	12.46	2
老河口	1954 年	15.22	11.37	2
钟祥	1954 年	17.95	14.31	2
荆州	1954 年	17.06	13.72	2
恩施	1972 年	12.78	16.56	1
宜昌	1954 年	15.67	10.96	2
麻城	1972 年	10.56	14.03	1
房县	1991 年	12.69	12.29	2
枣阳	1989 年	10.49	14.29	1
咸宁	1972 年	10.90	15.50	1

注:麻城、房县、枣阳、咸宁 4 个代表站 1954 年后建站。

表 2 湖北省 6 个代表站 1954 年、2008 年两次低温雨雪冰冻综合指数比较

项目	连续雨雪日数(天)		连续低温日数(天)		过程雨雪量(mm)		过程极端最低气温(°C)		连续低温平均气温(°C)		综合指数	
	1954	2008	1954	2008	1954	2008	1954	2008	1954	2008	1954	2008
武汉	15	21	24	22	75.6	62.2	-14.6	-5.2	-4.2	-1.2	15.32	12.46
老河口	17	22	26	22	52.5	38.0	-13.8	-6.5	-4.4	-1.6	15.22	11.37
钟祥	16	22	21	22	58.7	39.0	-14.4	-8.6	-4.7	-1.7	17.95	14.31
荆州	25	22	11	22	57.0	32.0	-14.8	-6.1	-3.8	-1.3	17.06	13.72
恩施	13	22	6	5	12.0	26.0	-2.2	-2.9	-0.9	-1.5	10.39	16.56
宜昌	16	22	18	10	43.9	31.0	-6.2	-3.6	-2.5	-0.6	15.67	10.96

表 2 对湖北省 6 个代表站 1954 年 12 月 26 日至 1 月 18 日和 2008 年 1 月 11 日至 2 月 3 日的两次低温雨雪冰冻过程连续雨雪日数、连续低温日数、过程雨雪量、过程极端最低气温和过程平均气温进行比较,2008 年连

续雨雪日数超过 1954 年,但除恩施以外其余 5 站连续低温日数、过程雨雪量、过程极端最低气温、过程平均气温都未超过 1954 年。

续雨雪日数超过 1954 年,但除恩施以外其余 5 站连续低温日数、过程雨雪量、过程极端最低气温、过程平均气温都未超过 1954 年。从灾情发生程度看,1954 年汉口至樊城的 540 多公里汉江封冻。全省电讯、电力

年;4 个站为历史第一(其中 3 个站 1954 年后建站)。可以认为 2008 年初低温雨雪冰冻过程是 1954 年以来最严重的低温雨雪冰冻过程。

图 1 是武汉市 1951—2008 年历年最长低温雨雪冰冻过程综合指数变化曲线,可以看出,武汉历史上最严重的 5 次低温雨雪冰冻过程分别出现在为 1954 年、2008 年、1963 年、1977 年、1956 年,其中 2 次出现在 1950 年代,1 次出现在 1960 年代,1 次出现在 1970 年代,1 次出现在 21 世纪的 2008 年。随着气候变暖,1980 年代和 1990 年代低温雨雪冰冻过程综合指数都在 8.0 以下,低温雨雪冰冻过程的频次和强度低于 1970 年代及 1960 年代。

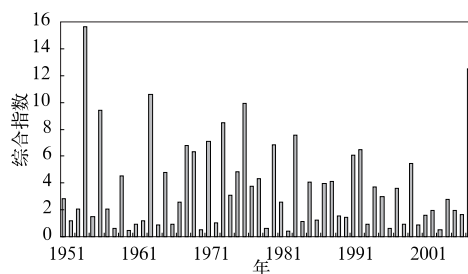


图 1 武汉市 1951—2008 年低温雨雪冰冻综合指数

设施受损,当时除 2 个专署、3 个县外,其它各县电讯完全中断。2008 年除交通影响比 1954 年严重,山区电力、农业生产受害程度比 1954 轻。

从低温雨雪冰冻过程实况和影响看,发生在 1954 年底和发生在 2008 年初的持续低温雨雪冰冻过程,都属于极端气候事件,但从强度上看,1954 年大于 2008 年,这与低温雨雪冰冻综合指数排位一致。因此,用综合指数评估定位持续低温雨雪冰冻过程,比较客观。

2.2 2008 年低温雨雪冰冻综合指数日变化

2008 年初低温雨雪冰冻过程综合指数逐日增大,灾害不断加重,历史定位也不断升级,如图 2 所示,3 条直线分别为 1954 年、1977 年、1992 年低温雨雪冰冻过程结束时综合指数。可以看出,1 月 21 日过程严重程度超过 1992 年,27 日超过 1977 年,即 21 日前为 1992 年以来最重、27 日前为 1977 年以来最重、27 日后则演变为 1954 年以来最严重的一次低温雨雪冰冻极端气候事件。

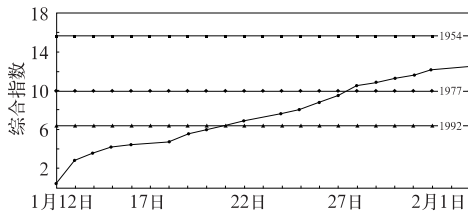


图 2 2008 年低温雨雪冰冻综合指数日变化

从此次低温雨雪冰冻灾害对社会经济造成的损失日变化曲线(图3)可以看出,27日

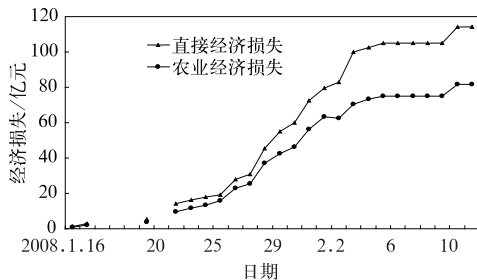


图 3 湖北省 1 月 14 日至 2 月 14 日低温雨雪冰冻灾害经济损失逐日变化

后经济损失陡增。综合指数与经济损失两者对应关系较好,用综合指数表示低温雨雪冰冻强度比较客观。

3 低温雨雪冰冻极端气候事件历史重现期

根据概率统计学^[6],对一组低温雨雪冰冻综合指数随机样本,找出其概率分布表达式,可计算出一定重现期对应的综合指数或某一综合指数历史重现期,从而对低温雨雪冰冻过程进行历史分析和定位。

利用 Gumbel 型极值分布及概率模型计算持续低温雨雪冰冻极端气候事件历史重现期^[6]方法如下:

综合指数极大值 Z_{\max} 的分布服从下列分布函数:

$$F(z) = P(z_{\max} < z) = \exp(-\exp(-\alpha(z-u))) \quad (2)$$

则:

$$P(z_{\max} \geq z) = 1 - \exp(-\exp(-\alpha(z-u))) \quad (3)$$

式中 $F(z)$ 为极大值的分布函数, $P(Z_{\max} < Z)$ 为极大值的概率分布表达式, $1 - \exp(-\exp(-\alpha(z-u)))$ 为极大值的 Gumbel 分布函数, α 及 u 是极大值分布参数,计算公式为:

$$\alpha = \frac{S_y}{S_z} \quad (4)$$

$$u = \bar{z} - \frac{S_z}{S_y} \bar{y} \quad (5)$$

其中 S_z 、 \bar{z} 由多年低温雨雪冰冻综合指数样本序列 $(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$ 求得, S_y 、 \bar{y} 由 $y_m = -\ln(-\ln(1 - \frac{m}{n+1}))$, $m=1, 2, 3, \dots, n$ 计算的序列求得。

由历年低温雨雪冰冻综合指数可以估计出参数 α 及 u 的值后,再将式(3)变换

$$Z_p = -\frac{1}{\alpha} \ln(-\ln(1-p)) + u \quad (6)$$

式中 Z_p 是给定概率值 P 下的极大值,指几年或几十年一遇的低温雨雪冰冻综合指数

值,由式(6)可以求出不同重现期的低温雨雪冰冻综合指数,也可得出某一综合指数的历史重现期。计算结果见表 3、图 4。

由图 4(武汉、荆州、恩施、宜昌 4 站曲线,其它站略),可以查出任一低温雨雪冰冻过程综合指数的历史重现期,也可以反查不

同重现期对应的低温雨雪冰冻过程综合指数。利用该图可以得出,湖北省 10 个代表站 2008 年低温雨雪冰冻过程综合指数的历史重现期,武汉市 1951 年以来 6 次主要低温雨雪冰冻过程历史重现期(表 4、表 5)。

表 3 湖北省 10 个代表站低温雨雪冰冻极端气候事件历史重现期

重现期	30 年	40 年	50 年	60 年	70 年	80 年	90 年	100 年
武汉	10.39	11.11	11.66	12.11	12.49	12.82	13.11	13.37
老河口	9.95	10.59	11.09	11.49	11.83	12.13	12.39	12.62
钟祥	12.23	13.09	13.76	14.30	14.76	15.15	15.50	15.81
荆州	11.20	11.98	12.58	13.06	13.47	13.83	14.14	14.43
恩施	12.01	12.86	13.52	14.06	14.51	14.90	15.24	15.55
宜昌	9.60	10.24	10.74	11.15	11.49	11.80	12.06	12.29
麻城	9.78	10.44	10.94	11.36	11.70	12.01	12.27	12.51
房县	11.11	11.81	12.35	12.78	13.15	13.47	13.75	14.00
枣阳	10.41	11.05	11.55	11.95	12.29	12.58	12.85	13.08
咸阳	10.87	11.61	12.18	1.65	13.04	13.39	13.69	13.95

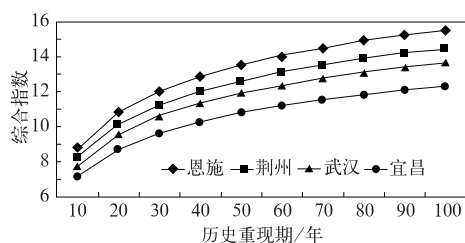


图 4 综合指数与重现期对应曲线(每站 1 条曲线)

表 4 湖北省 10 个代表站 2008 年低温雨雪冰冻过程重现期

站名	武汉	老河口	钟祥	荆州	恩施	宜昌	麻城	房县	枣阳	咸阳
2008 年综合指数	12.46	11.37	14.31	13.72	15.56	10.96	14.03	12.29	14.29	15.50
重现期	70 年	55 年	60 年	75 年	100 年	55 年	130 年	46 年	120 年	130 年

表 5 武汉市 1951 年以来主要低温雨雪冰冻过程历史重现期

历史上主要低温过程	综合指数	重现期
1954 年 12 月 26 日至 1955 年 1 月 18 日	15.62	130 年
1964 年 2 月 8—19 日	10.58	35 年
1977 年 1 月 18 日至 2 月 3 日	11.38	45 年
1984 年 1 月 15—26 日	7.53	10 年
1991 年 12 月 24 日至 1992 年 1 月 1 日	6.67	7 年
2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日	12.46	70 年

从表 4 可以看出,湖北省 10 个代表站 2008 年初低温雨雪冰冻过程综合指数 10.96~15.56 之间,历史重现期基本在 55 年以上,武汉为 70 年,恩施、枣阳等地达 100 年以上。因此可以得出结论:从全省范围看,2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日为 1954 年以来最为严重的一次低温雨雪冰冻过程,总体上为 60 年一遇。

4 结论

(1) 用低温雨雪过程连续雨雪日数及期间雨雪总量作为评估雨雪部分的两项指标,用日平均气温 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 的连续日数、期间平均气温和过程极端最低气温三个要素作为评估低温部分的三项指标,采用多指标综合指数

分析低温雨雪冰冻害过程历史排位、重现期的方法简单、可行,结论客观,便于业务使用。

(2) 湖北省 10 个代表站有 6 个站 2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日过程综合指数为历史第二(仅次于 1954 年),4 个站为历史第一(其中 3 个站 1954 年后建站)。由此得出 2008 年初低温雨雪冰冻过程是 1954 年以来最严重的低温雨雪冰冻过程。

(3) 湖北省 10 个代表站 2008 年初低温雨雪冰冻过程综合指数在 10.96~15.56 之间,9 个站历史重现期在 55 年以上,武汉为 70 年,恩施、枣阳等地达 100 年以上。可以得出结论:湖北省 2008 年 1 月 12 日至 2 月 3 日低温雨雪冰冻过程为 1954 年以来最为严重的一次初低温雨雪冰冻过程,总体上为 60

年一遇。

参考文献

- [1] 陈正洪,杨红青.长江三峡柑桔的冻害和热害(一)[J].长江流域资源与环境,1993,2(3):225-260.
- [2] 乔盛西,吴宜进.湖北省 1991 年柑桔冻害与避冻栽培区划[J].应用气象学报,1996,7(1):124-127.
- [3] 王凌,高歌,张强,等.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,2008,34(4):95-100.
- [4] 王遵娅,张强,陈峪,等.2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征[J].气候变化研究进展,2008,4(2):63-67.
- [5] 叶宗裕.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,2003,12:24-25.
- [6] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993:391-412.