

谷秀杰,田金华,王友贺,等,2025.河南低温雨雪冰冻气象等级及时空特征[J].气象,51(3):313-323. Gu X J, Tian J H, Wang Y H, et al, 2025. Meteorological grade and its spatio-temporal characteristics of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province[J]. Meteor Mon, 51(3):313-323(in Chinese).

河南低温雨雪冰冻气象等级及时空特征^{*}

谷秀杰^{1,2} 田金华³ 王友贺^{1,2} 齐伊玲^{1,2} 郭紫薇^{1,2}

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

2 河南省气象台,郑州 450003

3 郑州市气象局,郑州 450007

提 要: 利用河南 1991—2020 年冬半年观测资料,通过数理统计确定低温阈值,明确低温雨雪冰冻过程及持续时间,计算各个站气象指数并进行等级划分。对分级结果进行时空特征统计及典型个例分析,结果表明:豫西山区为低温雨雪冰冻高发区,豫西南盆地和豫西北为低发区;所有站点从轻度到特重等级多年平均频次均为依次递减趋势;纬度高低与低温雨雪冰冻发生频次和等级并不是正相关关系,低纬度站点发生特重等级的频次甚至多于高纬度和山区站点。2001 年低温雨雪冰冻站次最多且强度大,2007 年站次最少且均为轻度,2018 年低温雨雪冰冻较严重;1 月累计发生低温雨雪冰冻站次为各月之首,其次是 2 月。气温和降水是影响低温雨雪冰冻的关键因子,气温低、降水量大有利于低温雨雪冰冻天气发生,温度是影响高海拔地区冰冻等级的主要因子,累计降水量是影响平原地区冰冻等级的主要因子。天气系统位置、强度及移动速度决定着低温雨雪冰冻发生区域、等级和持续时长。

关键词: 低温雨雪冰冻,气象等级,时空特征,典型个例分析

中图分类号: P468, P429

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.031405

Meteorological Grade and Its Spatio-Temporal Characteristics of Cryogenic Freezing Rain and Snow in Henan Province

GU Xiujie^{1,2} TIAN Jinhua³ WANG Youhe^{1,2} QI Yiling^{1,2} GUO Ziwei^{1,2}

1 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, CMA, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

3 Zhengzhou Meteorological Bureau, Zhengzhou 450007

Abstract: Based on the observation data of Henan Province during the winter half of the year from 1991 to 2020, the low temperature threshold, the process and duration of cryogenic freezing rain and snow are determined by mathematical statistics, and the meteorological indexes of each station are calculated and classified. The classification results are then subjected to spatio-temporal characteristic statistics and analysis of typical cases. The results show that the mountainous area of western Henan is a high incidence area of cryogenic freezing rain and snow, while the basins of southwestern Henan and northwestern Henan are the low incidence areas. The multi-year average frequency of the cryogenic freezing rain and snow at all sites is in descending trend from light to the heavy grade. The frequency and grade of cryogenic freezing rain and snow are not positively correlated with the latitude level, and extra-heavy events occur even more frequently at low-latitude sites than at high-latitude and mountain sites. In 2001, the number of cryogenic freezing

^{*} 河南省气象局面上项目(KM202302)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2024-077)和河南省科技研发计划联合基金项目(242103810095)共同资助

2024 年 2 月 11 日收稿; 2024 年 6 月 4 日收修定稿

第一作者:谷秀杰,主要从事天气预报和灾害性天气诊断分析研究. E-mail:gxjwang@163.com

rain and snow sites and frequencies was the most and the intensity was high, while in 2007, the number was the least and the intensity was mild. In 2018, the cryogenic freezing rain and snow was serious. January is the month to have the highest number of cryogenic freezing rain and snow sites and frequencies, followed by February. Temperature and precipitation are the key factors for the cryogenic freezing rain and snow. Low temperature and heavy precipitation are favorable for the occurrence of freezing weather. Temperature is the main factor affecting the frozen grade in the high altitude area while accumulated precipitation is the primary factor determining the frozen grade in the plain area. In addition, the location, intensity and moving speed of the weather system determine the hit area, grade and duration of cryogenic freezing rain and snow.

Key words: cryogenic freezing rain and snow, meteorological grade, spatio-temporal characteristic, typical case analysis

引 言

2008 年 1 月 10 日至 2 月 2 日我国经历了 4 次大范围低温雨雪冰冻天气过程,全国有 20 个省(自治区、直辖市)不同程度受灾,造成的影响几乎涉及各行业及人民生产生活的各个方面,直接经济损失之大、受灾人口之多为近 50 年来同类灾害之最(王东海等,2008;王遵娅等,2008;Zhou et al,2011)。2009 年 11 月 9—12 日,河北省出现了历史罕见的暴雪天气,同时伴有雨雪冰冻灾害,造成直接经济损失达 15 亿元以上(张迎新等,2011)。之后众多学者开展了低温雨雪冰冻天气多角度成因分析与评估方法研究。2008 年的低温雨雪冰冻灾害形成的原因不是单一的,是多种因素在同一时段、同一地区相互配合和叠加的结果,其中拉尼娜事件是灾害发生的气候背景(丁一汇等,2008;赵思雄和孙建华,2008;Wen et al,2009;Wang et al,2020);大范围冰雪天气过程是由欧亚大陆出现异常的大气环流所致,乌拉尔山地区有高压脊稳定维持,西风带多小波动活动,南支槽和西太平洋副热带高压的加强提供了必要的暖湿条件(陶诗言和卫捷,2008;彭京备和孙淑清,2019;高辉等,2008;李崇银等,2008;Liao et al,2018;Chen et al,2019)。此外,林良勋等(2009)分析了广东 2008 年低温雨雪冰冻灾害成因及气象应急响应开展情况;覃志年等(2010)和唐熠等(2013)研究了 2008 年初广西异常低温雨雪冰冻天气影响因子并建立了广西重大低温雨雪冰冻天气过程概念模型;吴古会等(2012)和杜小玲等(2010;2012;2014)总结了贵州低温雨雪冰冻天气成因和概念模型;王记芳等(2009)对 2008 年初河南低温雨雪冰冻天气的气候特征及环流特点进行了分析。

上述研究揭示了极端低温雨雪冰冻事件的成

因、气候特征,并探究其应对措施。此外,也有一些学者着眼于灾害风险定量评估。宗海锋等(2022)提出中国南方冬季大范围持续性低温、雨雪和冰冻组合性灾害事件的客观识别方法;王遵娅等(2008)从持续日数出发,分别建立了对低温、降雪、冰冻多年一遇的评估方法;万素琴等(2008)对湖北省低温雨雪综合过程指数进行计算;贺芳芳和邵步粉(2011)则结合上海的气候特征,建立了上海地区低温雨雪冰冻指标并分析了各区灾害风险;赵晓萌等(2011)针对西南地区的气候特征,给出了西南地区覆冰的气象阈值条件;李兰等(2011)和顾婷婷等(2016)分别评估了低温雨雪冰冻对武汉城市公共交通的影响以及浙江省高速公路低温雨雪冰冻灾害风险;诸多学者(胡菊芳等,2008;唐熠等,2021;王颖等,2013;毛淑君和李栋梁,2015)分别对全国和南方等地低温雨雪冰冻灾害危险性进行了评估和区划,均取得了有意义的研究成果,为后续研究提供了有益的参考。

虽然众多气象工作者对不同区域的低温雨雪冰冻天气成因及评估指标已有一些研究,但由于不同区域所处的气候带及地形地貌不同,其低温雨雪冰冻评估指标也存在明显差异。河南地处暖温带和亚热带过渡区,地势为西高东低,由平原、盆地、山地、丘陵和水面构成,地形地貌较为复杂。此外,除了 2008 年,河南近年来也出现了较严重的低温雨雪冰冻过程,如 2018 年 1 月 3—4 日、12 月 4—10 日,2020 年 1 月 4—7 日。为了科学有效防范、应对低温雨雪冰冻灾害,已出台相应预案,但目前河南尚无低温雨雪冰冻灾害气象等级划分标准;另外,当一次低温雨雪冰冻天气发生后或预计将要发生时,如何客观评估该次过程严重程度并给出明确等级划分呢?基于以上因素,急需构建符合河南天气气候特征的低温雨雪冰冻气象指数并进行等级划分,基于分级结果,总结概括河南低温雨雪冰冻时空特征及

影响其强度的敏感因子,以期更好地服务于低温雨雪冰冻天气预报工作。

1 资 料

本文所用统计资料源自“气象大数据云平台·天擎”资料库中的1991—2020年历年1—3月和11—12月河南逐日降水量、积雪深度、日平均气温、日最低气温、天气现象等观测数据。综合考虑记录完整性、代表性等因素,筛选出116个国家级气象观测站数据进行研究。全文所用时间为北京时。

2 低温雨雪冰冻判识及等级划分

2.1 低温雨雪冰冻日判识标准

2.1.1 低温要素的选取

低温雨雪冰冻中的低温条件不同于传统意义上的低温,传统意义上的低温是指日最低气温低于某一个临界值时,可能会产生人体冻伤或农作物减产等危害,称为一次低温过程。如河南,预计未来24 h某测站最低气温 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ 时,将发布低温蓝色预警信号。而低温雨雪冰冻中的低温是指当有降雪或降雨发生时能够产生积雪、结冰天气现象并使其持续的气温临界值,因此对低温雨雪冰冻进行研究的关键前提是,表征低温的气象要素的选择及其阈值的确定。

尽管最低气温能代表一定的寒冷性,但不能全面反映寒冷程度,尤其对于河南来说,秋冬交界和冬春交界时气温日较差大,夜晚气温低,白天气温高,不利于雨雪冰冻天气的发生和持续。对低温雨雪冰冻的研究多采用日平均气温作为低温的判识指标(万素琴等,2008;贺芳芳和邵步粉,2011;毛淑君和李栋梁,2015;石艳等,2023)。因为日平均气温能够在一定程度上反映整体气温的高低,当日平均气温较低时,日较差一般较小,有利于雨雪冰冻天气的发生和持续;此外,在有一定降水的前提下,日平均气温对冰冻强度有重要影响,因此本文亦采用日平均气温低于某一临界值来界定低温雨雪冰冻日。

2.1.2 低温阈值的界定

提取1991—2020年历年1—3月和11—12月观测资料中有降水发生且出现积雪或结冰站点的日平均气温数据。对提取的数据进行分级概率统计,结果显示(图1),当测站出现降水且有积雪或结冰

发生时,日平均气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 的概率可达77.1%。

低温阈值应低于某一时间段内气候平均值。因此,分别计算了1991—2020年1—3月、11—12月各月和11月至次年3月以及12月至次年2月全省日平均气温多年平均值(表1)。结果显示,11月和3月河南日平均气温多年平均值明显高于其他月份,分别为 8.8°C 和 9.5°C ,11月至次年3月也显著高于12月至次年2月,1月最低,为 0.8°C 。大多数低温雨雪冰冻发生在冬季(12月至次年2月),因此,该低温阈值应至少低于12月至次年2月的多年平均值(2.6°C)。

低温雨雪冰冻灾害主要有由降雪或降雨后遇低温形成积雪、结冰导致的交通瘫痪、电线结冰等危害。当有降雨发生,但没有适当的低温条件未出现结冰现象时,不会给人民生产、生活造成较大影响。因此,对1991—2020年历年1—3月和11—12月各月纯雨、雨雪冰冻站次及其占比进行统计(表2)发现,11月和3月降水多以纯雨为主,发生雨雪冰冻的概率非常低,分别为19.5%和23.1%,说明低温阈值低于12月至次年2月河南日平均气温多年平均值(2.6°C)是合理的。但若将该阈值取在 $\leq 1^{\circ}\text{C}$,则有近40%的低温雨雪冰冻被漏掉,若将该阈值取在 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,则可涵盖77.1%的低温雨雪冰冻(图1)。

进一步对各月积雪或冰冻持续日数统计(表3)发现,11月和3月不同持续时长发生的站次均明显低于12月、1月和2月,其中3月持续5 d及以上合计只有10站次。1月不同持续时长发生的站次均显著高于其他月份,2月持续4 d及以下站次均位列第二,12月持续4 d及以下站次均位列第三,结合上

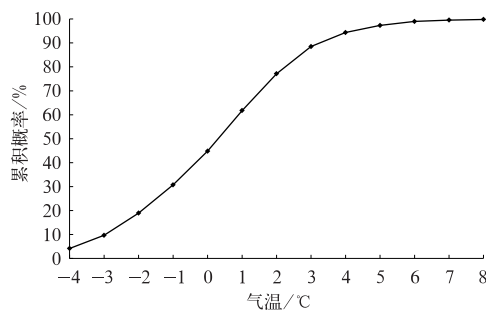


图1 1991—2020年河南冬半年结冰日
日平均气温累积概率分布

Fig. 1 Distribution of cumulative probability
of daily mean temperature in Henan Province
in icing days of the winter half years
from 1991 to 2020

表 1 1991—2020 年河南不同月份日平均气温多年平均值统计
Table 1 Statistics of the multi-year average of daily mean temperature
in Henan Province in different months from 1991 to 2020

要素	1 月	2 月	3 月	11 月	12 月	11 月至 3 月	12 月至 2 月
日平均气温/℃	0.8	4.1	9.5	8.8	2.8	5.2	2.6

表 2 1991—2020 年河南不同月份纯雨、雨雪冰冻站次及其占比统计
Table 2 Statistics of pure rain, freezing rain and snow station numbers and the
proportion in Henan Province in different months from 1991 to 2020

类型	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
纯雨/站次	13 715	4719	2302	7050	13 999
雨雪冰冻/站次	3322	7198	11 091	8774	4207
合计/站次	17 037	11 917	13 393	15 824	18 206
雨雪冰冻占比/%	19.5	60.4	82.8	55.4	23.1

表 3 1991—2020 年河南不同月份积雪或结冰持续日数统计
Table 3 Statistics of the persistent days of snow cover or icing in Henan Province
in different months from 1991 to 2020

持续日数/d	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
1	645	1798	2327	2039	839
2	421	1072	1741	1573	467
3	155	257	674	426	101
4	56	138	305	185	75
5	1	135	155	99	8
≥6	16	49	131	28	2

述统计表明,12 月至次年 2 月是历年低温雨雪冰冻集中发生时段。综上分析并考虑实操性,本文选取日平均气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 作为低温雨雪冰冻日低温阈值,即当日平均气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$,且有降雪发生或者降雪(雨)后有积雪(或结冰)存在,记为一个低温雨雪冰冻日;低温雨雪冰冻日从开始至结束全部演变过程为一次低温雨雪冰冻过程;过程发生的总天数为持续日数。

2.2 低温雨雪冰冻气象指数构建

低温雨雪冰冻灾害主要取决于雨雪强度及低温程度,因此,选取表征雨雪强度的降水量和积雪深度,表征低温程度的日平均气温和最低气温以及低温雨雪冰冻持续日数,构建低温雨雪冰冻气象指数。某次过程气温越低、降水量越大、积雪越深、持续时间越长,则气象指数越大,表明该次低温雨雪冰冻过程越严重,造成的灾害也可能越大。任意一次低温雨雪过程,上述 5 个气象因子中,日平均气温、最低气温和持续日数的标准差均较小,累计降水量和积雪深度的标准差略大,但一般积雪深度正比于累计降水量,因此累计降水量对指数贡献最大。

依据上述低温雨雪冰冻日、持续日数划分标准及其气象指数构建因子,对 1991—2020 年历年 1—3 月和 11—12 月河南 116 个国家级气象观测站低

温雨雪冰冻过程进行筛选,分别计算过程日平均气温的平均值、日最低气温的最低值、累计降水量、最大积雪深度、持续日数。

2.2.1 低温雨雪冰冻气象指数的计算

设某观测站有 n 次低温雨雪冰冻过程,则第 i 次低温雨雪冰冻气象指数(I_i)计算方法如下(四川省市场监督管理局,2021):

$$I_i = \frac{T1_i}{\overline{T1}} + \frac{T2_i}{\overline{T2}} + \frac{R_i}{\overline{R}} + \frac{S_i}{\overline{S}} + \frac{D_i}{\overline{D}} \quad (1)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

式中: $T1_i$ 为日平均气温平均值, $T2_i$ 为最低气温, R_i 为过程累计降水量, S_i 为最大积雪深度, D_i 为过程持续日数, $\overline{T1}$ 、 $\overline{T2}$ 、 $\overline{R}$ 、 $\overline{S}$ 、 $\overline{D}$ 分别为测站 1991—2020 年所有低温雨雪冰冻过程的日平均气温、最低气温、累计降水量、最大积雪深度及持续日数的平均值。由于低温雨雪冰冻过程平均气温或最低气温越低,代表过程越严重,因此平均气温或最低气温属于逆向指标,在实际计算时需要将气温序列进行正向化处理。以日平均气温的平均值 $\overline{T1}$ 为例,当站点的过程平均 $\overline{T1} > 0^{\circ}\text{C}$ 时,首先基于公式 $(T1_{\max} - T1)$ 对各个低温雨雪冰冻过程的 $T1$ 序列进行正向化处理,再进行气象指数计算, $T2$ 同理。

2.2.2 标准化低温雨雪冰冻气象指数的计算

由于计算的气象指数各站差异较大,为了便于比较,将其进行标准化处理,即第*i*次标准化低温雨雪冰冻气象指数计算如下:

$$M_i = \frac{I_i - \bar{I}}{\sigma} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

式中: $\bar{I}$ 、 σ 分别为测站1991—2020年所有低温雨雪冰冻气象指数的平均值和标准差。

2.3 低温雨雪冰冻等级划分

河南各观测站标准化低温雨雪冰冻气象指数(*M*)的计算结果显示,*M*分布在-1.8~4.6(图2),其平均值为0,标准差为1.9。以*M*的平均值和标准差的1/2为依据,采用标准差分类法(汤国安和杨昕,2006),并结合*M*各区间占比情况(图2)以及实操性,将0、1、2作为划分不同等级的临界值,将河南低温雨雪冰冻划分为轻、中、重、特重四个等级(表4)。

3 低温雨雪冰冻分级统计特征

3.1 空间分布特征

根据2.3节低温雨雪冰冻等级划分标准,对1991—2020年河南各等级低温雨雪冰冻过程多年平均频次空间分布进行统计(图3)。轻度低温雨雪冰冻多年平均频次(图3a)高值区位于豫西山区,中心值为4.07;低值区分布在豫西南盆地和豫西北。中度频次(图3b)高值区主要位于豫西山区,中心值为1.77,此外在豫西北、豫中等地有分散的大值中心;低值区分布在豫北、豫西南和豫东南。重度频次(图3c)高值区位于豫中,中心值为0.73;低值区分

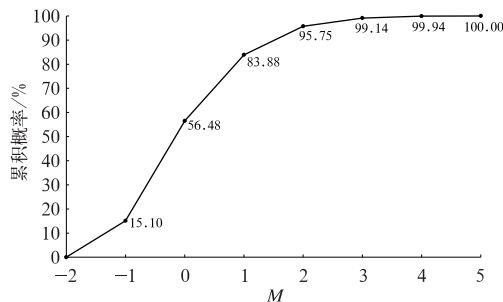


图2 1991—2020年河南标准化低温雨雪冰冻气象指数的累积概率分布

Fig. 2 Distribution of cumulative probability of standardized cryogenic freezing rain and snow meteorological index in Henan Province from 1991 to 2020

表4 1991—2020年河南低温雨雪冰冻气象等级划分
Table 4 Meteorological classification of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province from 1991 to 2020

等级	标准化低温雨雪冰冻气象指数(<i>M</i>)
轻	$M \leq 0$
中	$0 < M \leq 1$
重	$1 < M \leq 2$
特重	$M > 2$

布在豫西南盆地。特重级频次(图3d)高值区位于豫西和豫东南,中心值为0.40;低值区分布在豫西南盆地和豫西北。上述分析表明,豫西山区为低温雨雪冰冻高发区,豫西南盆地和豫西北为低发区。所有站点从轻度到特重等级多年平均频次均为依次递减。

3.2 时间演变特征

3.2.1 月份演变特征

对1991—2020年1—3月和11—12月河南低温雨雪冰冻过程各月累计发生站次进行统计(图4)显示,月均为2798站次,12月、1月和2月发生站次明显高于平均值,合计占比为85.5%,1月累计发生站次最多,为5106站次,占比为36.5%;且轻、中、重、特重各级别发生站次均为各月之首。其次是2月累计发生3824站次,占比为27.3%;且轻、中、重各级别发生站次均位列第二。11月和3月发生站次明显低于月平均值。

3.2.2 年代际演变特征

对1991—2020年河南各等级低温雨雪冰冻过程发生站次统计(图5)显示,有13992站次累计出现低温雨雪冰冻过程,年均466站次;其中轻度站次最多,特重站次最少。低温雨雪冰冻发生总站次位列前三的年份分别为2001年、2006年和1994年,与轻度等级发生站次位列前三的年份一致。2001年低温雨雪冰冻发生站次多且强度大,总站次、中度站次和特重站次均为最多年份,轻度站次位列第三。尽管2018年低温雨雪冰冻过程发生总站次位列第十二位,但重度站次位列历年之首、特重站次位列第二,说明2018年低温雨雪冰冻较严重。

上述对历年不同等级低温雨雪冰冻过程发生站次统计分析发现,各年份间有一定差异,最多年份(2001年)与最少年份(2007年)相差900多站次,为了初步探讨如此大差异的可能成因,对影响气象指数的敏感因子,即气温和降水量进行统计(表5),由

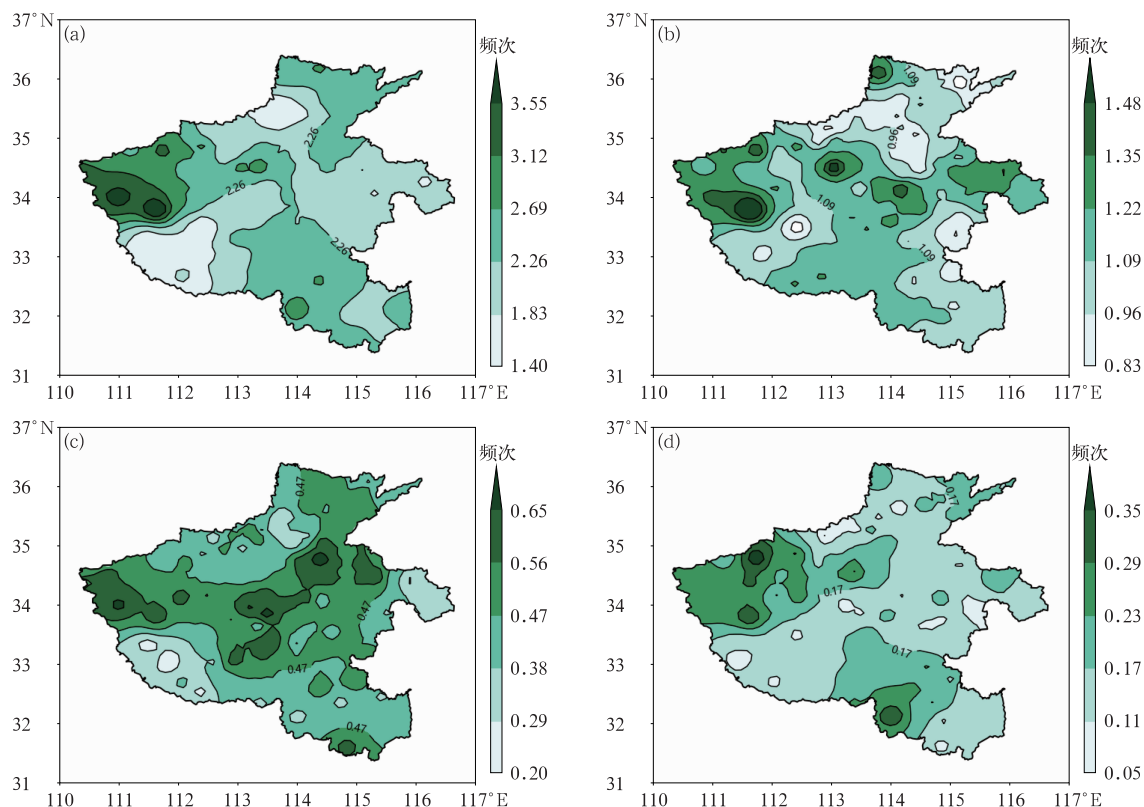


图 3 1991—2020 年河南低温雨雪冰冻各等级多年平均频次(填色和等值线)空间分布
(a)轻,(b)中,(c)重,(d)特重

Fig. 3 Spatial distribution of multi-year average number of times (colored and contour) of (a) light, (b) medium, (c) heavy and (d) extremely heavy grades of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province from 1991 to 2020

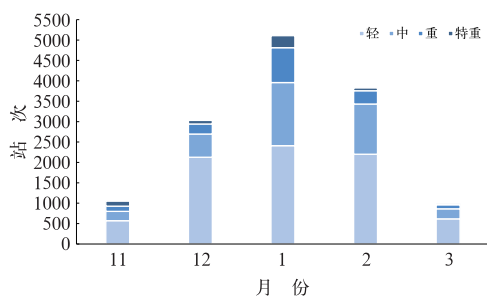


图 4 1991—2020 年河南不同月份低温雨雪冰冻过程累计发生站次对比

Fig. 4 Comparison of monthly cumulative station numbers of cryogenic freezing rain and snow process in Henan Province in different months from 1991 to 2020

表 5 可知,低温雨雪冰冻显著偏多的 2001 年 1 月、2 月和 12 月,即低温雨雪冰冻发生的关键时段,河南平均气温明显低于多年平均值,平均降水量显著高于多年平均值。然而显著偏少的 2007 年与 2001 年恰好相反,2007 年 1 月、2 月、11 月河南平均气温明

显高于多年平均值,平均降水量显著低于多年平均值,尽管 12 月降水量略高于多年平均值,但平均气温明显高于多年平均值,不利于冰冻的形成。上述分析再次表明,气温和降水是影响低温雨雪冰冻的关键因子,气温低、降水多有利于低温雨雪冰冻的产生。

3.3 代表站统计特点

河南地势为西高东低,西北部、西部、南部分别为太行山、伏牛山、桐柏山和大别山,中部和东部为黄淮海平原,西南部为南阳盆地。为了探寻处于不同纬度、不同地势测站的各等级低温雨雪冰冻发生频次的异同点,选取位于豫北的安阳站(海拔高度 63.5 m)、豫西山区的卢氏站(海拔高度 569.9 m)、豫中的郑州站(海拔高度 111.3 m)、豫东的商丘站(海拔高度 51.5 m)以及豫南的信阳站(海拔高度 115.1 m),5 个处于不同方位、不同海拔高度的站点作为代表(图 6a)。对每个代表站 1991—2020 年各等级低温雨雪冰冻发生频次及总频次进行统计(图 6b)可见,

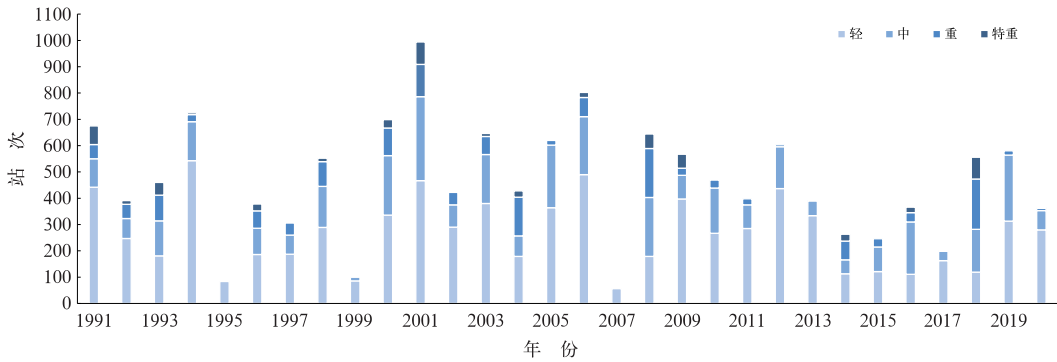


图 5 1991—2020 年河南低温雨雪冰冻过程发生站次逐年变化

Fig. 5 Annual variation of the station numbers of cryogenic freezing rain and snow processes in Henan Province from 1991 to 2020

表 5 1991—2000 年、2001 年和 2007 年 1—3 月及 11 月、12 月河南各月平均气温及平均降水量

Table 5 Average temperature and average precipitation in Henan Province from January to March, November and December in 1991—2000, 2001 and 2007

年份	1 月		2 月		3 月		11 月		12 月	
	平均气温/℃	平均降水量/mm	平均气温/℃	平均降水量/mm	平均气温/℃	平均降水量/mm	平均气温/℃	平均降水量/mm	平均气温/℃	平均降水量/mm
1991—2000	0.8	14	1.8	15	9.6	29.2	8.8	31.8	2.8	11.7
2001	−0.5	42.5	0.5	43.5	10.8	6.8	8.9	3.9	0.9	44.9
2007	1.6	1.7	2.6	2.7	9.6	71.3	9.0	10.9	3.7	13.1

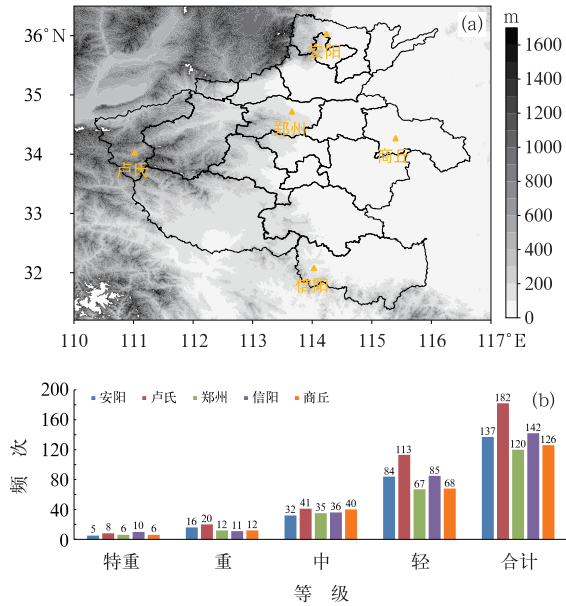


图 6 河南(a)地形(阴影)及代表站

(三角)分布,(b)1991—2020 年

各代表站低温雨雪冰冻发生频次分级统计

Fig. 6 (a) Distribution of topography (shaded) and representative stations (triangle), (b) statistics of frequency classification of cryogenic freezing rain and snow at each representative station in Henan Province from 1991 to 2020

纬度高低与低温雨雪冰冻发生频次及等级并不是正相关关系,信阳站位于河南东南部,为 5 个代表站中纬度最低的站点,但其发生低温雨雪冰冻的总频次仅次于西部山区的卢氏站,且特重等级的频次最多,这可能是由于其纬度低,水汽条件好于其他站,冬季降水相对较多,当有降水发生时遇到合适的温度便会形成冰冻。卢氏站除特重等级发生频次低于信阳站外,其他等级发生频次以及总频次均多于其他站点,尤其轻度和总频次明显高于其他站点,这与卢氏站的地理位置有一定的关系,该站位于西部山区,海拔相对较高,易出现低温与冰冻。安阳站位于河南北部,为 5 个代表站中纬度最高的站点,尽管纬度最高且温度低于信阳站,但降水较少,因此发生低温雨雪冰冻的总频次低于信阳。

3.4 典型个例分析

选取 2008 年 1 月 10—13 日(简称“0801”)和 2018 年 1 月 3—4 日(简称“1801”)河南两次较明显低温雨雪冰冻过程作为典型个例,探讨低温雨雪冰冻空间分布的可能成因以及影响低温雨雪冰冻等级的关键因子。

由低温雨雪冰冻等级空间分布(图 7)可知,

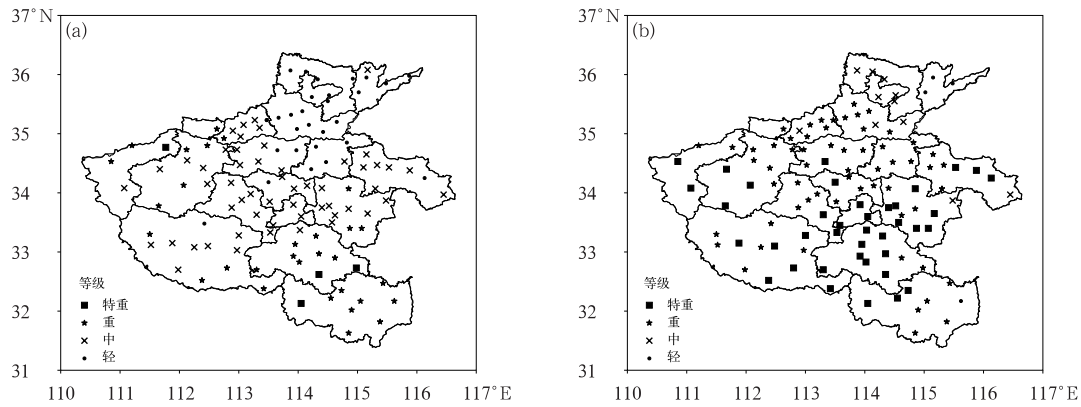


图 7 河南低温雨雪冰冻等级空间分布

(a)2008 年 1 月 10—13 日,(b)2018 年 1 月 3—4 日

Fig. 7 Spatial distribution of grades of cryogenic freezing rain and snow in Henan Province during (a) 10—13 January 2008 and (b) 3—4 January 2018

“0801”过程沿黄河及其以南大部为中度以上等级,其中西部山区和东南部为重度,局地特重(图 7a);“1801”过程河南大部均为中度以上等级,沿黄河及其以南大部为重度,其中西部、东南部和东部部分地区为特重。尽管两次过程各站点在等级上有较大差异,但空间分布有一定相似性,如东北部均为轻度,西部和东南部为特重,该分布与图 3 的中度和特重两个等级的空间分布也有较大相似性。

“0801”低温雨雪冰冻过程持续时间长于“1801”,但后者明显强于前者,尤其重度和特重站点明显多于前者。对比影响气象指数的关键气象因子发现:在“1801”过程中,多数站点日平均气温和最低气温均低于“0801”、过程降水量高于“0801”。在同一次过程中,以“0801”为例(表 6),一般过程降水量大的站点等级较高,如信阳站过程最低气温和过程

平均气温均高于卢氏站,但过程降水量明显多于卢氏站,致使低温雨雪冰冻等级高出卢氏站两个等级;处在西部山区的卢氏站与处在北部平原的安阳站过程降水量差别较小,但卢氏站气温明显低于安阳站,因此卢氏站低温雨雪冰冻等级高于安阳站;卢氏站与东部平原商丘站对比发现,商丘站过程降水量高于卢氏站,但气温低于卢氏站,二者均为中度等级;同样处在平原的安阳站和商丘站对比可知,两个站气温差别较小,但商丘站过程降水量较安阳站多 8.6 mm,最终低温雨雪冰冻等级较安阳高出一个等级。上述分析表明,影响站点低温雨雪冰冻等级的主要气象因子为过程降水量和气温。但海拔高度不同时影响站点等级的主要因子有所差异,西部山区主要由温度较低造成,东部平原主要由过程降水量较大造成。

表 6 “0801”过程各代表站关键气象要素对比

Table 6 Comparison of key meteorological elements at each representative station in the January 2008 process

不同要素	安阳	卢氏	郑州	商丘	信阳
	轻	中	轻	中	特重
过程降水量/mm	3.1	3.7	4.3	11.7	23.7
过程最低气温/℃	−2.4	−6.9	−2.6	−2.8	−4.6
过程平均气温/℃	−1.0	−3.3	−0.3	−0.1	−1.6

低温雨雪冰冻的发生发展与天气系统有直接关系,下面简要对比两次过程地面及高空系统的异同点(图 8)及其对低温雨雪冰冻落区和强度的影响。两次过程地面冷高压中心强度及路径基本一致,过程期间均在贝加尔湖附近有一个中心气压为 1060 hPa 的高压中心,且以中路南下影响华北至长江流域。

显著差异在于,“0801”过程(图 8a)长江以南为暖低压控制,锋区位于 30°~33°N,冷暖势力在河南南部到湖北一带长时间对峙,雨雪冰冻天气持续;而“1801”过程(图 8b)冷空气前锋快速南下到华南,在河南境内停留时间较短,雨雪冰冻持续时间也相对较短。两次过程高空影响系统也较相似,500 hPa 均

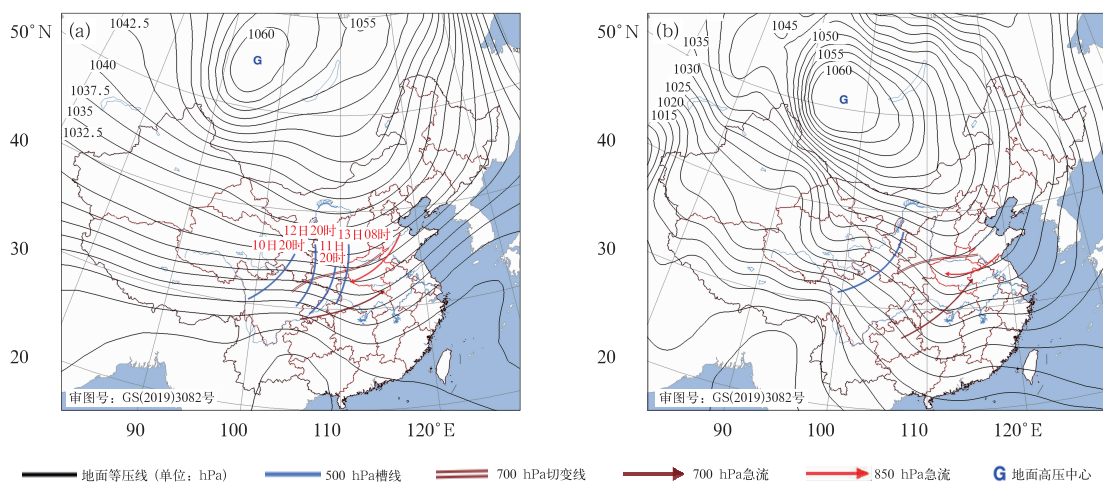


图8 两次低温雨雪冰冻过程影响系统综合图

(a)2008年1月11日20时,(b)2018年1月3日20时

Fig. 8 Comprehensive map of the impact system of two processes of cryogenic freezing rain and snow at (a) 20:00 BT 11 January 2008 and (b) 20:00 BT 3 January 2018

为低槽,但不同点在于:“0801”过程有多个短波槽不断东移影响河南,而“1801”过程只是一次低槽自西向东影响河南,因此较“0801”过程持续时间短;700 hPa均为切变线和西南急流,但“0801”过程切变线位置较“1801”过程略偏南,急流强度略偏弱,因而雨雪冰冻强度弱于“1801”过程;两次过程850 hPa均为东北风或偏东风急流。上述分析表明,天气系统位置、强度及移动速度决定着低温雨雪冰冻发生区域、等级和持续时长,影响系统持续时长与低温雨雪冰冻天气正相关,水汽条件充沛、降水量大则低温雨雪冰冻等级高。

4 结论与讨论

本文对1991—2020年河南低温雨雪冰冻过程进行了分级计算,统计分析了不同等级的时空分布特征,并对典型个例进行了对比分析,具体结论如下:

(1)通过数理统计确定日平均气温 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ 作为单站低温雨雪冰冻日低温阈值;在此基础上,明确低温雨雪冰冻过程及持续时间;选取敏感因子,构建低温雨雪冰冻气象指数,依据标准化气象指数将低温雨雪冰冻划分为轻、中、重、特重四个等级。

(2)对1991—2020年不同等级低温雨雪冰冻进行时空特征分析表明,豫西山区为低温雨雪冰冻高发区,豫西南盆地和豫西北为低发区;纬度高低与低温雨雪冰冻发生频次及等级并不是正相关关系,低

纬度站点发生特重等级的频次甚至多于高纬度和山区站点。累计出现低温雨雪冰冻过程2001年发生站次最多,为994站次;2007年发生站次最少,只有56站次且均为轻度;1月累计发生站次为各月之首,其次是2月。

(3)气温和降水是影响低温雨雪冰冻的关键因子,气温低、降水量大有利于冰冻天气发生,温度是影响高海拔地区冰冻等级的主要因子,累计降水量是影响平原地区冰冻等级的主要因子。天气系统位置、强度及移动速度决定着低温雨雪冰冻发生区域、等级和持续时长。

本文构建了河南单站低温雨雪冰冻等级划分指数,后期可在此基础上开展区域性低温雨雪冰冻过程等级划分及评估方法研究。

参考文献

- 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等,2008. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报, 66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):808-825(in Chinese).
- 杜小玲,高守亭,彭芳,2014. 2011年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究[J]. 大气科学, 38(1):61-72. Du X L, Gao S T, Peng F, 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1):61-72(in Chinese).
- 杜小玲,高守亭,许可,等,2012. 中高纬阻塞环流背景下贵州强冻雨特征及概念模型研究[J]. 暴雨灾害, 31(1):15-22. Du X L, Gao S T, Xu K, et al, 2012. Study on the synoptic features of strong

- freezing rain with blocking pattern in Guizhou and conceptual model[J]. Torr Rain Dis, 31(1): 15-22(in Chinese).
- 杜小玲, 彭芳, 武文辉, 2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析[J]. 气象, 36(5): 92-97. Du X L, Peng F, Wu W H, 2010. Distribution and cause on frequent freezing rain zone in Guizhou[J]. Meteor Mon, 36(5): 92-97(in Chinese).
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等, 2008. 2008年1月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析Ⅱ. 成因分析[J]. 气象, 34(4): 101-106. Gao H, Chen L J, Jia X L, et al, 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008: Ⅱ. possible climatic causes[J]. Meteor Mon, 34(4): 101-106(in Chinese).
- 顾婷婷, 潘娅英, 骆月珍, 2016. 浙江省高速公路低温雨雪冰冻灾害风险评估与区划[J]. 气象与环境学报, 32(3): 102-106. Gu T T, Pan Y Y, Luo Y Z, 2016. Risk division and assessment of low-temperature, rain/snow and freezing disasters on highway in Zhejiang Province[J]. J Meteor Environ, 32(3): 102-106(in Chinese).
- 贺芳芳, 邵步粉, 2011. 上海地区低温、雨雪、冰冻灾害的风险区划[J]. 气象科学, 31(1): 33-39. He F F, Shao B F, 2011. Risk regionalization of meteorological disasters caused by cryogenic freezing rain and snow in Shanghai[J]. Sci Meteor Sin, 31(1): 33-39(in Chinese).
- 胡菊芳, 王怀清, 彭静, 等, 2008. 2008年1—2月江西低温雨雪冰冻灾害分析评估[J]. 气象与减灾研究, 31(1): 67-72. Hu J F, Wang H Q, Peng J, et al, 2008. Analysis and evaluation of the low temperature, sleet and frost disaster during January to February 2008 in Jiangxi[J]. Meteor Dis Reduct Res, 31(1): 67-72(in Chinese).
- 李崇银, 杨辉, 顾薇, 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析[J]. 气候与环境研究, 13(2): 113-122. Li C Y, Yang H, Gu W, 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(2): 113-122(in Chinese).
- 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]. Resour Environ Yangtze Basin, 20(11): 1400-1404(in Chinese).
- 林良勋, 吴乃庚, 蔡安安, 等, 2009. 广东2008年低温雨雪冰冻灾害及气象应急响应[J]. 气象, 35(5): 26-33. Lin L X, Wu N G, Cai A A, et al, 2009. Disaster and emergency response of the cryogenic freezing rain and snow weather in Guangdong in 2008[J]. Meteor Mon, 35(5): 26-33(in Chinese).
- 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]. J Glaciol Geocryol, 37(1): 14-26(in Chinese).
- 彭京备, 孙淑清, 2019. 2018年1月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系[J]. 大气科学, 43(6): 1233-1244. Peng J B, Sun S Q, 2019. Formation of rainy and snowy weather in South China in January 2018 and its relationship with the abnormal East Asian winter monsoon[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1233-1244(in Chinese).
- 覃志年, 钟利华, 刘莉红, 等, 2010. 2008年初广西异常低温雨雪冰冻天气影响因子分析[J]. 气象, 36(10): 14-20. Qin Z N, Zhong L H, Liu L H, et al, 2010. Analysis on influence factors of the abnormal low temperature, sleet and frost weather in Guangxi at the beginning of 2008[J]. Meteor Mon, 36(10): 14-20(in Chinese).
- 石艳, 杜正静, 谭健, 等, 2023. 贵州低温阴雨指标构建及适用性分析[J]. 气象与环境科学, 46(1): 1-6. Shi Y, Du Z J, Tan J, et al, 2023. Index construction and applicability analysis of low temperature and rainy process in Guizhou Province[J]. Meteor Environ Sci, 46(1): 1-6(in Chinese).
- 四川省市场监督管理局, 2021. 川西高原低温雨雪冰冻灾害气象指标等级: DB51/T 2830—2021[S]. 成都: 四川省市场监督管理局. Sichuan Province Market Supervision and Administration Bureau, 2021. Grade of disaster meteorological index of frozen rain and frost snow on western Sichuan Plateau. DB51/T 2830—2021[S]. Chengdu: Sichuan Province Market Supervision and Administration Bureau(in Chinese).
- 汤国安, 杨昕, 2006. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社. Tang G A, Yang X, 2006. ArcGIS Geographical Information System Space Analysis Tutorial[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 唐熠, 韦健, 周文志, 等, 2013. 广西重大低温雨雪冰冻天气过程概念模型分析[J]. 灾害学, 28(2): 25-30. Tang Y, Wei J, Zhou W Z, et al, 2013. Analysis on the conceptual model of major cryogenic freezing rain and snow in Guangxi[J]. J Catastrophol, 28(2): 25-30(in Chinese).
- 唐熠, 谢晓燕, 周秀华, 等, 2021. 广西低温雨雪冰冻灾害危险性评估和区划[J]. 灾害学, 36(4): 101-106. Tang Y, Xie X Y, Zhou X H, et al, 2021. Assessment and zoning of low-temperature, rain/snow and freezing disasters in Guangxi[J]. J Catastrophol, 36(4): 101-106(in Chinese).
- 陶诗言, 卫捷, 2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. 气候与环境研究, 13(4): 337-350. Tao S Y, Wei J, 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China[J]. Climatic Environ Res, 13(4): 337-350(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 34(11): 40-46(in Chinese).
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等, 2008. 2008年1月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析[J]. 气象学报, 66(3): 405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al, 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the southern China in January 2008[J]. Acta Meteor Sin,

- 66(3):405-422(in Chinese).
- 王记芳,顾万龙,潘攀,等,2009.2008年初河南低温雨雪冰冻天气的气候特征及环流特点[J].气象与环境科学,32(1):51-54. Wang J F, Gu W L, Pan P, et al, 2009. Climate characteristics and circulation features of the extremely low temperature and snow-ice disasters in early 2008 in Henan[J]. Meteor Environ Sci, 32(1): 51-54(in Chinese).
- 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]. Meteor Mon, 39(5): 585-591(in Chinese).
- 王遵娅,张强,陈峪,等,2008.2008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,4(2):63-67. Wang Z Y, Zhang Q, Chen Y, et al, 2008. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China[J]. Adv Climate Change Res, 4(2):63-67(in Chinese).
- 吴古会,彭芳,崔庭,等,2012.2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析[J].气象,38(3):291-299. Wu G H, Peng F, Cui T, et al, 2012. Analysis of Guizhou's rare freezing catastrophic weather in winter 2011[J]. Meteor Mon, 38(3):291-299(in Chinese).
- 张迎新,张守保,裴玉杰,等,2011.2009年11月华北暴雪过程的诊断分析[J].高原气象,30(5):1204-1212. Zhang Y X, Zhang S B, Pei Y J, et al, 2011. Diagnostic analysis on snowstorm process in North China in November 2009[J]. Plateau Meteor, 30(5): 1204-1212(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,2008.2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征[J].气候与环境研究,13(4):351-367. Zhao S X, Sun J H, 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January-February 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(4):351-367(in Chinese).
- 赵晓萌,李栋梁,熊海星,等,2011.西南地区覆冰气象要素的变化特征及综合评估[J].自然资源学报,26(5):802-813. Zhao X M, Li D L, Xiong H X, et al, 2011. Variations of meteorological factors concerning icing and comprehensive assessment in Southwest China[J]. J Nat Res, 26(5):802-813(in Chinese).
- 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 C, 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]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1055-1070(in Chinese).
- Chen S F, Wu R G, Song L Y, et al, 2019. Interannual variability of surface air temperature over mid-high latitudes of Eurasia during boreal autumn[J]. Clim Dynam, 53(3/4):1805-1821.
- Liao Z, Zhai P M, Chen Y, et al, 2018. Atmospheric circulation patterns associated with persistent wet-freezing events over southern China[J]. Int J Climatol, 38(10):3976-3990.
- Wang Z Y, Ding Y H, Zhou B T, et al, 2020. Comparison of two severe low-temperature snowstorm and ice freezing events in China: role of Eurasian mid-high latitude circulation patterns[J]. Int J Climatol, 40(7):3436-3450.
- Wen M, Song Y, Arun K, et al, 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorms affecting China in January 2008[J]. Mon Wea Rev, 137:1111-1131.
- Zhou B Z, Gu L H, Ding Y H, et al, 2011. The great 2008 Chinese ice storm: its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned[J]. B Am Meteorol Soc, 92(1):47-60.

(本文责编:张芳)