

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

宗海锋¹ 布和朝鲁¹ 彭京备¹ 林大伟²

1. 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心，北京 100029
2. 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室，北京，100081

摘要 组合性灾害事件是指同时出现的若干个天气灾害的组合，它的发生会明显加重致灾程度。本文利用 1961—2013 年冬季我国南方区域 206 个台站的日平均温度、日降水量及雨淞资料，建立了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，并揭示了 3 类组合性灾害事件的关键特征。首先，基于低温、雨雪、冰冻天气的强度和面积阈值以及持续天数建立了大范围持续性低温事件、雨雪事件以及冰冻事件各自的客观判识方法。在此基础上界定出了 3 类常见组合性灾害事件，即低温-雨雪灾害事件(C-RS)、低温-冰冻灾害事件(C-F)以及低温-雨雪-冰冻灾害事件(C-RS-F)。3 类组合性灾害事件常见于 1 月上旬—2 月中旬。尽管 3 类组合性灾害事件在低温和降水等方面有相似之处，但其形成条件却明显不同。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，而逆温层和冷垫则是低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件发生的必要条件。亚洲中高纬大型斜脊系统是低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件的关键环流特征，为强冷空气活动提供了有利环流条件。低温-雨雪灾害事件期间亚洲中高纬则盛行波状环流，有利于适度冷空气活动。在水汽供应和逆温层形成方面，3 类组合性灾害事件受控于不同的副热带异常环流系统。孟加拉湾南支槽和南海上空异常反气旋分别是低温-雨雪灾害事件和低温-冰冻灾害事件形成的副热带关键环流系统，而孟加拉湾南支槽和西北太平洋异常反气旋相结合为低温-雨雪-冰冻灾害事件形成的副热

作者简介 宗海锋，男，1975 年出生，主要从事短期气候预测及极端天气气候事件研究。

E-mail: zhf@mail.iap.ac.cn

通讯作者 布和朝鲁，E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41975072 和 41675086，国家科技支撑计划项目 2015BAC03B03 Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41975072 and 41675086), National Key Technologies R&D Program of China (Grant 2015BAC03B03)

带关键环流系统。

关键词 大型斜脊 南支槽 西北太平洋异常反气旋 逆温层

稿件编号: 2021052B

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2108.21052

Combined disaster events of extensive and persistent low temperature, rain/snow and freezing in southern China: Objective identification and key features

Haifeng Zong¹, Cholaw Bueh¹, Jingbei Peng¹, Dawei Lin²

1. International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, China Academy of Sciences, Beijing 200029

2. Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract Combined disaster event refers to the combination of several weather disasters that occur at the same time, and its occurrence will obviously aggravate the disaster. Using daily mean temperature, precipitation and glaze data of 206 stations over southern China in winter during the period from 1961 to 2013, an objective identification method is established for combined disaster events of extensive and persistent low temperature, rain/snow and freezing weather in winter, and the key features of these three kinds of combined disaster events are discussed. First, identification methods for extensive and persistent low temperature, rain/snow and freezing events are proposed, respectively, based on thresholds of their intensities and impact areas. On this basis, three most noteworthy combined disaster events, namely cold-rain/snow disaster event (C-RS), cold-freezing disaster event (C-F) and cold-rain/snow-freezing disaster event (C-RS-F) are identified. The three kinds of combined disaster events often occur during the period from early January to mid-February. Although the three kinds of combined disaster events have similarities

in low temperature and precipitation, their formation conditions are obviously different. Abundant water vapor supply and large-scale strong water vapor convergence are key conditions for the occurrence of cold-rain/snow disaster event and cold-rain/snow-freezing disaster event, while inversion layer and cold pad are necessary conditions for the occurrence of cold-freezing disaster event and cold-rain/snow-freezing disaster event. The large-scale tilted ridge in the mid- and high latitude Asia is the key circulation feature of cold-freezing disaster event and cold-rain/snow-freezing disaster event, which provides favorable circulation conditions for strong cold air activities. During the cold-rain/snow disaster event, wavy circulation prevails in mid- and high latitude Asia, which is conducive to moderate cold air activities. In terms of water vapor supply and formation of inversion layer, the three kinds of combined disaster events are controlled by different subtropical anomalous circulation systems. The southern branch trough over the Bay of Bengal and the anomalous anticyclone over the South China Sea are key subtropical circulation systems for the formation of cold-rain/snow disaster event and cold-freezing disaster event respectively, while the combination of the southern branch trough over the Bay of Bengal and anomalous anticyclone over Northwestern Pacific is the key circulation system for the formation of cold-rain/snow-freezing disaster event.

keywords large-scale tilted ridge, trough over the Bay of Bengal, anomalous anticyclone over Northwestern Pacific, inversion layer

1 引言

低温、雨雪和冰冻都是冬季常见的气象灾害，当它们同时出现或以不同组合形式一起发生，会明显加重致灾程度。2008年1月，我国南方发生了历史罕见的低温雨雪冰冻灾害事件（以下简称“0801”事件），造成全国20省（区、市）遭受低温雨雪冰冻灾害，部分地区冰冻日数长达10~20天，全国1亿多人口受灾，直接经济损失高达1500多亿元(王凌等，2008)。“0801”事件的突出特征是低温、雨雪、冻雨天气并存并且强度大、持续时间长(丁一汇等，2008)。如此大范围、长时间的组合性灾害事件在历史上少见，因此引起了气象工作者的广泛关注和研究(布和朝鲁等，2008；曾明剑等，2008；陈伟等，2008；丁一汇等，2008；高辉等，2008；顾雷等，2008；纪立人等，2008；李崇银等，2008；马晓刚，2009；彭京备和孙淑清，2019；施宁等，2008；孙建华和赵思雄，2008；陶诗言和卫捷，2008)。

“0801”事件的成因是比较复杂的，它的发生是多种影响因子在同一时段、同一地区相互配合和迭加的结果。前期研究表明，欧亚大气环流持续异常，包括乌拉尔山-贝加尔湖地区阻塞高压的加强和维持，为持续冷空气侵入我国南方地区提供了重要环流条件(李崇银等，2008)；南支槽和西太平洋副高的加强为我国南方地区雨雪天气提供了十分必要的暖湿气流条件(布和朝鲁等，2008；丁一汇等，2008；高辉等，2008；李崇银等，2008；陶诗言和卫捷，2008)。La Niña事件为灾害发生提供了有利气候背景(丁一汇等，2008；高辉等，2008)。由此可见，“0801”事件的发生是La Niña气候背景下中高纬环流与副热带环流相互影响和综合作用的结果。

“0801”事件中低温、雨雪、冰冻这3类灾害天气均很突出，但它们的配置是有区别的。该事件实际上包含了4次主要天气过程，每次过程的雨雪、冻雨天气发生区域和强度都存在差异(陶诗言和卫捷，2008；赵思雄和孙建华，2008)。图1给出了“0801”事件期间，低温、雨雪和冰冻影响面积，可以发现，4次天气过程中，低温、雨雪、冰冻的影响面积以及它们相互匹配特征都有明显的差异。由此可见，当研究不同组合性灾害事件时应该加以区别对待。多种组合性天气灾害事件在历史上曾多次出现(王凌等，2008；钱维宏和张宗婕，2012；宗志平等，

2013; Peng et al.,2021), 它们的影响范围以及造成的灾害各不相同且程度不一, 因此我们有必要对这些组合性天气灾害事件进行对比研究, 揭示它们的关键影响系统和成因。

本文是针对这种复杂系统的组合性天气灾害所做的一次尝试性研究。在开展某一种灾害天气事件研究之前, 对它们进行客观而定量识别是十分必要的。本文首先根据低温、雨雪和冰冻天气组合出现的特点, 提出对应的客观识别方法; 然后, 在此基础上分析组合性灾害事件的时空分布特征; 最后揭示它们对应的中高纬和副热带环流系统的配置特征。

2 资料和方法

本文所用资料主要是 (1) 中国气象局国家气象信息中心提供的逐日台站观测资料, 包括日平均温度、日降水量以及雨淞等观测变量; (2) 美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 全球逐日再分析数据集 (Kalnay et al.,1996), 包括位势高度场、风场、比湿场和海平面气压场, 空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。受缺少实际冰冻观测资料限制, 我们参照王遵娅(2011)的做法, 同时考虑到南方冰冻天气主要以雨淞为主(赵珊珊等, 2010), 文中采用雨淞资料判断有无冰冻天气的发生。本文研究时段取为 1961/62—2012/2013 年冬季, 其中冬季定义为前一年 12 月 1 日至当年 2 月 28 日。

文中研究区域为中国南方地区 ($20^{\circ} \text{N} \sim 35^{\circ} \text{N}, 102^{\circ} \text{E} \sim 123^{\circ} \text{E}$)。在这一区域, 我们剔除了研究时段内观测资料有缺测的台站, 最终选定了 206 个具有完整数据的台站, 其空间分布见图 2。

文中百分位分析方法用于确定灾害天气事件强度阈值和影响面积阈值, 合成分析方法用于分析组合性灾害事件中的温度、水汽通量异常、大气环流异常等的分布特征。为了检验合成结果的显著性, 文中还使用了 t 检验方法。

3 大范围持续性低温、雨雪和冰冻灾害事件的客观识别

3.1 定义

本文重点关注的是强度强、影响范围大且有一定持续性的低温、雨雪和冰冻灾害事件。因此, 首先需要确定它们的强度阈值。我们先将研究时段内每个台站全部的日平均温度和降水量由小到大进行排序。然后利用百分位分析方法分别选

取低温和雨雪的强度阈值。取台站温度升序序列第 25 百分位（下四分位）值作为台站的低温阈值 δ_T 。当台站温度 $\leq \delta_T$ 时即把该台站记为低温台站。考虑到我们关注的灾害事件与雨雪有关，要求必须有一定的降水量，因此我们只对降水量升序序列中降水量 $> 0\text{mm}$ 的序列片段进行百分位分析，取其第 50 百分位（中分位）值为台站的多雨雪阈值 δ_P ，当台站降水量 $\geq \delta_P$ 时即把该台站记为多雨雪台站（以下简称雨雪台站）。低温和雨雪的阈值的空间分布见图 2b 和 2c。鉴于雨凇数据只有“有和无”记录而无强度记录，故本文直接将雨凇发生的台站记为冰冻台站。

其次，确定每日低温、雨雪、冰冻的影响面积。按照 Peng and Bueh(2011) 关于界定大范围持续性低温事件中的做法，将研究区域分割成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的网格。中国南方区域 206 个站共分布在 168 个网格内（图 2a）。以每天低温（雨雪、冰冻）台站所占的网格数作为该日低温（雨雪、冰冻）影响面积。

本文所关注的是大范围的气象灾害事件。为此，本文取低温和雨雪网格数升序序列的第 66.7 百分位（上三分位）的值作为低温灾害影响面积阈值 S_T （69 网格）和雨雪灾害影响面积阈值 S_P （41 网格）。实际中，冰冻灾害影响面积远小于低温灾害和雨雪灾害影响面积，且冬季日冰冻面积为 0 的日数非常多。我们关注的是有且范围大的冰冻事件，我们也只对冰冻网格数升序序列中冰冻网格数 > 0 的序列片段进行百分位分析，取其第 90 百分位的值作为冰冻灾害影响面积阈值 S_F （13 网格）。若某日低温网格数 $\geq S_T$ ，则将该日记作大范围低温日。同理，当某日雨雪网格数 $\geq S_P$ （冰冻网格数 $\geq S_F$ ）时，将该日记作大范围雨雪（冰冻）日。

最后，根据大范围低温、雨雪和冰冻的持续时间确定灾害性事件。考虑到冬季大范围持续性雨雪灾害事件的持续时间往往比低温灾害事件要短 (Peng and Bueh, 2011; Zong et al., 2014)，参照 Zong et al. (2014) 关于冬季极端降水和 Peng et al.(2021) 关于低温雨雪冰冻事件持续天数的设定，本文中将大范围持续性低温、雨雪、冰冻灾害事件的持续天数阈值统一取为 3 天。当大范围低温（雨雪、冰冻）日持续 3 天或以上时就将其定义为一次大范围持续性低温（雨雪、冰冻）灾害事件。1961—2013 年，分别界定出了大范围持续性低温事件 160 次、雨雪事件 205 次和冰冻事件 48 次（图 3）。

下面我们将重点讨论这 3 类事件相互组合的灾害事件的客观识别及关键特征。

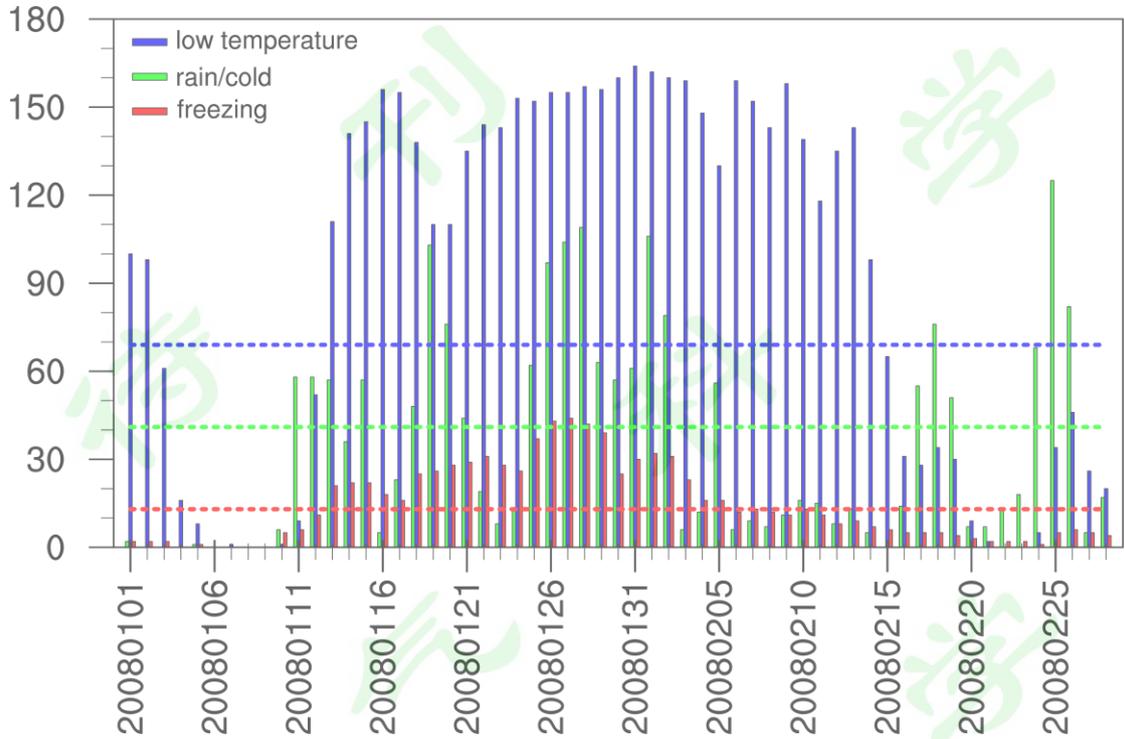


图 1 2008 年 1 月 1 日—2 月 28 日中国南方低温（蓝色柱）、雨雪（绿色柱）和冰冻（红色柱）影响面积（单位：格点）。图中蓝（绿、红）虚线分别为低温（雨雪、冰冻）影响面积阈值（单位：格点）。

Fig1 Impacted area of low temperature(blue bars), rain/snow(green bars) and freezing(red bars) from January 1 to February 28 of 2008 (units: grid) in southern China. The blue, green and red dash lines correspond to their thresholds respectively (units: grid).

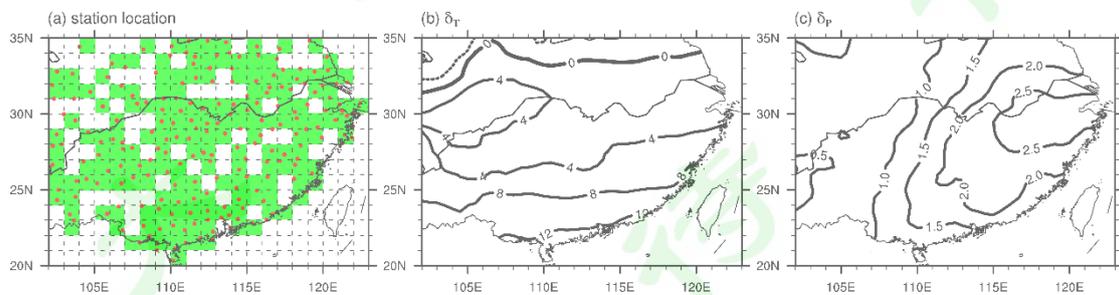


图 2 中国南方 (a) 206 站 (红点) 及其所占网格 (绿网格), (b) 低温阈值 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 (c) 雨雪阈值 (单位: mm/day) 空间分布。

Fig.2 Spatial distribution of (a) 206 stations(red dots) and grids on which 206 stations are located(green grids), threshold for (b) low temperature(units: °C) and (c) rain/snow(units: mm/day).

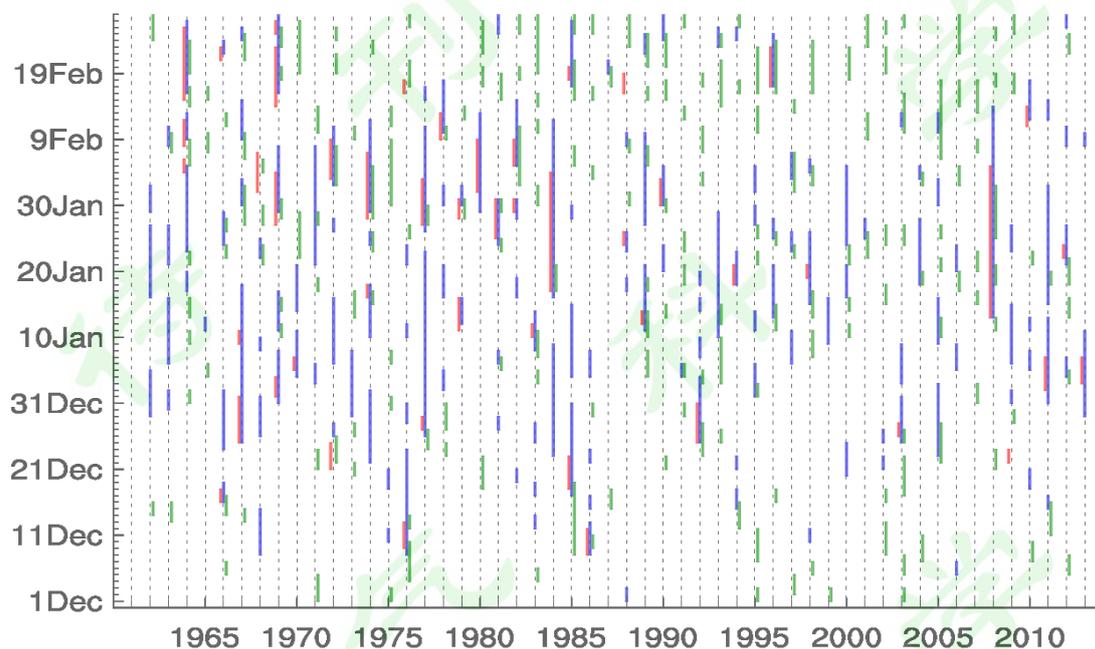


图 3 1961—2013 年冬季我国南方大范围持续性低温灾害事件（蓝色柱），大范围持续性雨雪灾害事件（绿色柱）和大范围持续性冰冻灾害事件（红色柱）发生时段。柱的下（上）缘对应事件开始（结束）日期，柱的长度对应事件持续天数（单位:天）。

Fig.3 Time of occurrence of extensive and persistent low temperature disaster events(blue bars), rain/snow disaster events(green bars) and freezing disaster events(red bars) in winter from 1961 to 2013 in southern China. The bottom (top) edge of bar corresponds to the start (end) date, and the length of bar corresponds to the persisting days of event(units: day).

3.2 不同组合型式

图 3 给出 1961—2013 年中国南方冬季大范围持续性低温、雨雪、冰冻灾害事件的发生时段。可以发现，它们的发生时段有的交织在一起（部分或全部重叠），有的互不重叠。如果将这 3 种灾害事件间不同的交织情况看作不同的组合型式，它们就可以组合成多种不同类型的灾害事件。由图 3 清晰可见，大范围持续性低温、雨雪、冰冻灾害事件存在 3 种组合方式：（1）非组合性（与另 2 种灾害事件

无交织)，(2) 两两组合性 (2 种灾害事件相互交织)，(3) 三者组合性 (3 种灾害事件同时交织在一起)。以“0801”事件为例，它实际上包含了大范围持续性低温、雨雪、冰冻灾害事件的多种组合 (图 3)。首先出现的是非组合性雨雪灾害事件，接着出现低温冰冻组合性灾害事件，之后出现 2 次低温、雨雪、冰冻组合性灾害事件，最后是非组合性低温灾害事件。上述事件顺序与陶诗言和卫捷 (2008) 和赵思雄和孙建华 (2008) 所提到的 4 次天气过程也是高度吻合的，只是起止日期和组合类型略有差别。这是由于本文中降水强度阈值和影响面积阈值取得比较高，其它定义也与他们略有差别所致。

由此可见，“0801”事件期间，实际上存在多种不同的组合性灾害事件，虽然它们都有低温背景，但其环流特征和成因理应有区别的。下面我们将根据大范围持续性低温、雨雪、冰冻灾害事件间的组合关系给出它们的识别方法，并对几种常见的组合性灾害事件进行对比分析，以进一步了解它们的关键特征和差异。

3.3 组合性灾害事件

根据大范围低温日、雨雪日和冰冻日的同步性及持续维持天数，组合性灾害的定义如下：

低温-雨雪灾害事件：如果大范围低温日和雨雪日同步出现并维持 3 天或以上，期间无大范围冰冻日出现，则称其为大范围持续性低温-雨雪组合性灾害事件，简称为低温-雨雪灾害事件 (C-RS)。

低温-冰冻灾害事件：如果大范围低温日和冰冻日同步出现并维持 3 天或以上，期间无大范围雨雪日出现，则称其为大范围持续性低温-冰冻组合性灾害事件，简称为低温-冰冻灾害事件 (C-F)。

雨雪-冰冻灾害事件：如果大范围雨雪日和冰冻日同步出现并维持 3 天或以上，期间无大范围低温日出现，则称其为大范围持续性雨雪-冰冻组合性灾害事件，简称为雨雪-冰冻灾害事件 (RS-F)。

低温-雨雪-冰冻灾害事件：如果大范围低温日、雨雪日和冰冻日同步出现并维持 3 天或以上，则称其为大范围持续性低温-雨雪-冰冻组合性灾害事件，简称为低温-雨雪-冰冻灾害事件 (C-RS-F)。

1961—2013 年期间，上述组合性灾害事件均有发生，只不过它们发生次数有很大差异。其中 低温-雨雪灾害事件、低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件最为常见，累计发生次数分别为 20 次、16 次和 17 次，而雨雪-冰冻灾害事件最为少见仅发生 1 次。本文将主要对 3 类较为常见的组合性灾害展开探讨，对雨雪-冰冻灾害事件不予讨论。表 1 给出了 3 类常见的组合性灾害事件的起止日期和持续天数。

为了区别于组合性灾害事件，我们将维持 3 天以上的纯粹的大范围低温灾害事件（雨雪灾害事件、冰冻灾害事件）称为非组合性低温（雨雪、冰冻）灾害事件，简记作 N-C（N-RS、N-F）。1961—2013 年期间，非组合性低温灾害事件、非组合性雨雪灾害事件分别发生了 91 次和 123 次，约占 3.1 节中低温事件和雨雪事件总数的 57% 和 60%。非组合性冰冻灾害事件没有发生。由非组合性低温灾害事件和非组合性雨雪灾害事件所占比例可知，它们的特征与一般性大范围持续性低温事件和雨雪事件特征大体是一致的，后者很多学者（Bueh et al.,2011a,b;Peng and Bueh,2011;Peng and Bueh,2012;Zong et al.,2014）已经做过深入研究，故本文对非组合性低温灾害事件和非组合性雨雪灾害事件不再讨论。

下面我们将进一步探讨 3 类常见的组合性灾害的时空特征及其差异。

表 1 3 类组合性灾害事件起止日期及持续天数

Table 1 Starting and ending dates, duration of three kind of combined-disastrous event.

编 号	低温-雨雪灾害事件 起止日期	持续 天数	低温-冰冻灾害事件 起止日期	持续 天数	低温-雨雪-冰冻灾害事件 起止日期	持续 天数
1	19630208—19630210	3	19640210—19640212	3	19640219—19640224	6
2	19670130—19670202	4	19661226—19661229	4	19680204—19680206	3
3	19680122—19680124	3	19670109—19670111	3	19690129—19690131	3
4	19710127—19710129	3	19690101—19690104	4	19690218—19690220	3
5	19740124—19740126	3	19700105—19700107	3	19720203—19720208	6
6	19850225—19850227	3	19800201—19800203	3	19740129—19740205	8

7	19860203—19860205	3	19810126—19810128	3	19770127—19770130	4
8	19890117—19890119	3	19820129—19820131	3	19810129—19810131	3
9	19890205—19890208	4	19840122—19840128	7	19820205—19820209	5
10	19910104—19910106	3	19880124—19880126	3	19840117—19840121	5
11	19920207—19920211	5	19911229—19911231	3	19850218—19850220	3
12	19930112—19930115	4	19940119—19940121	3	19851209—19851211	3
13	19930223—19930225	3	19980119—19980121	3	19890112—19890114	3
14	19960113—19960115	3	20080122—20080124	3	19911225—19911228	4
15	19970203—19970207	5	20110104—20110107	4	19960217—19960223	7
16	19980115—19980117	3	20130105—20130107	3	20080118—20080121	4
17	20040118—20040120	3	—	—	20080125—20080202	9
18	20041223—20041228	6	—	—	—	—
19	20050110—20050113	4	—	—	—	—
20	20050210—20050213	4	—	—	—	—

4 组合性灾害事件的时空特征

3类组合性灾害事件的出现存在明显的年际变化。图4给出这些组合性灾害事件的逐年累计频数和天数。作为对比，我们也给出了非组合性低温灾害事件的情况（图4a）。非组合性低温灾害事件（图4a）几乎每年都有发生，年发生次数多在2次及以上。对于组合性灾害事件（图4b—4d），它们发生年份少得多，年发生次数也多为1次。低温-雨雪灾害事件（图4b）1985—1998年活动频繁，1975—1984年期间以及2006以后没有出现。低温-冰冻灾害事件（图4c），1970年代和21世纪出罕有发生，其他年代比较常见。低温-雨雪-冰冻灾害事件（图4d），多见于1996年之前，2008年是1996年以后唯一发生低温-雨雪-冰冻灾害事件的年份，这年的累计频数虽不超过2次，累计天数却长达13天，造成了极为严重的灾害。不同组合性灾害事件和非组合性低温灾害事件之间年际活动差异表明，它们的发生除必须满足持续性低温条件外，还需要满足其它特定的条件。

组合性灾害事件的发生还存在明显的季内变化。图5为冬季各旬出现的组合

性灾害事件的多年累计频数。同样，作为对比，我们也给出了非组合性低温灾害事件的情况（图 5a）。可以看出，非组合性低温灾害事件（图 5a），几乎冬季所有旬（2月下旬除外）均有发生，累计频数也明显多于组合性灾害事件。特别是 12月下旬—1月下旬累计频数最多，为非组合性低温灾害事件发生集中期。低温-雨雪灾害事件（图 5b）集中期为 1月中旬—2月上旬。低温-冰冻灾害事件（图 5c）集中期为 1月上旬和 1月下旬，这与李杰等（2015）结果也是一致的。低温-雨雪-冰冻灾害事件（图 5d）集中期为 1月中旬—2月中旬。

另外，不同组合性灾害事件的集中影响区域也不同。针对不同灾害事件，分别统计了我国南方地区每个台站达到灾害性事件标准的次数与该事件总数的比率（图 6）。比率大表示受灾害事件影响次数多，反之，受灾害事件影响次数少。因此比率大的区域也是灾害事件的集中影响区域。非组合性低温灾害事件（图 6a）整个南方地区比率均超过了 0.9。表明整个南方都是饱受非组合性低温灾害事件影响的区域。低温-雨雪灾害事件（图 6b）集中影响区域位于长江以南。低温-冰冻灾害事件（图 6c）集中影响区域位于贵州—湖南一带。低温-雨雪-冰冻灾害事件（图 6d）集中影响区位于贵州、湖南和江西一带（其中湖南更为突出）。值得注意的是，低温-雨雪-冰冻灾害事件虽与低温-冰冻灾害事件发生次数相近，但影响集中区域更广，更应加以重视。

综上所述，虽然持续性低温是组合性灾害事件发生的首要前提条件，若仅有持续性低温但没有有利的雨雪或冰冻发生条件，上述组合性灾害事件也是难以发生的。下面我们将从中高纬大气环流与冷空气活动、副热带环流系统与水汽条件以及温度层结等角度探讨不同组合性灾害事件的关键特征及差异。

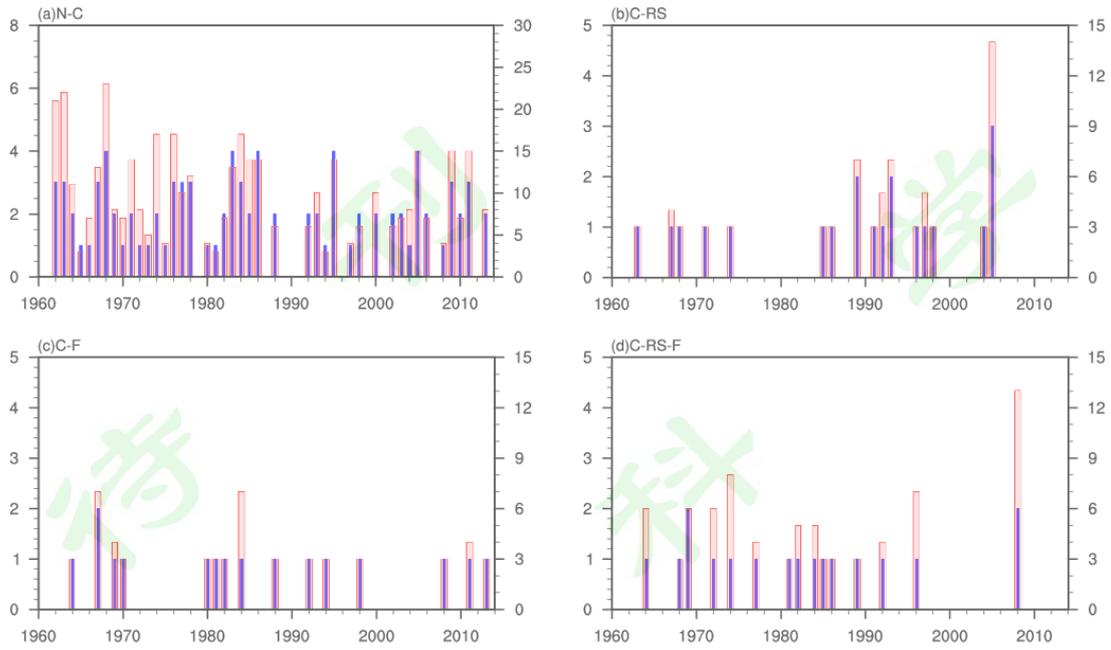


图 4 1961—2013 年不同灾害事件逐年累计频数（蓝色柱，单位：次）和天数（红色柱，单位：天）：（a）非组合性低温灾害事件，（b）低温-雨雪灾害事件，（c）低温-冰冻灾害事件和（d）低温-雨雪-冰冻灾害事件。图的左、右纵坐标刻度分别对应累计频数值和累计天数值。

Fig.4 Cumulative number (blue bars, units:time) and days (red bars, units:day) of different disastrous events in winter from 1961 to 2013: (a) non-combined cold disaster event, (b) cold-rain/snow disaster event, (c) cold-freezing disaster event and (d) cold-rain/snow-freezing disaster event. The scales of the left and right Y-axis correspond to the cumulative occurrences and days respectively in figure.

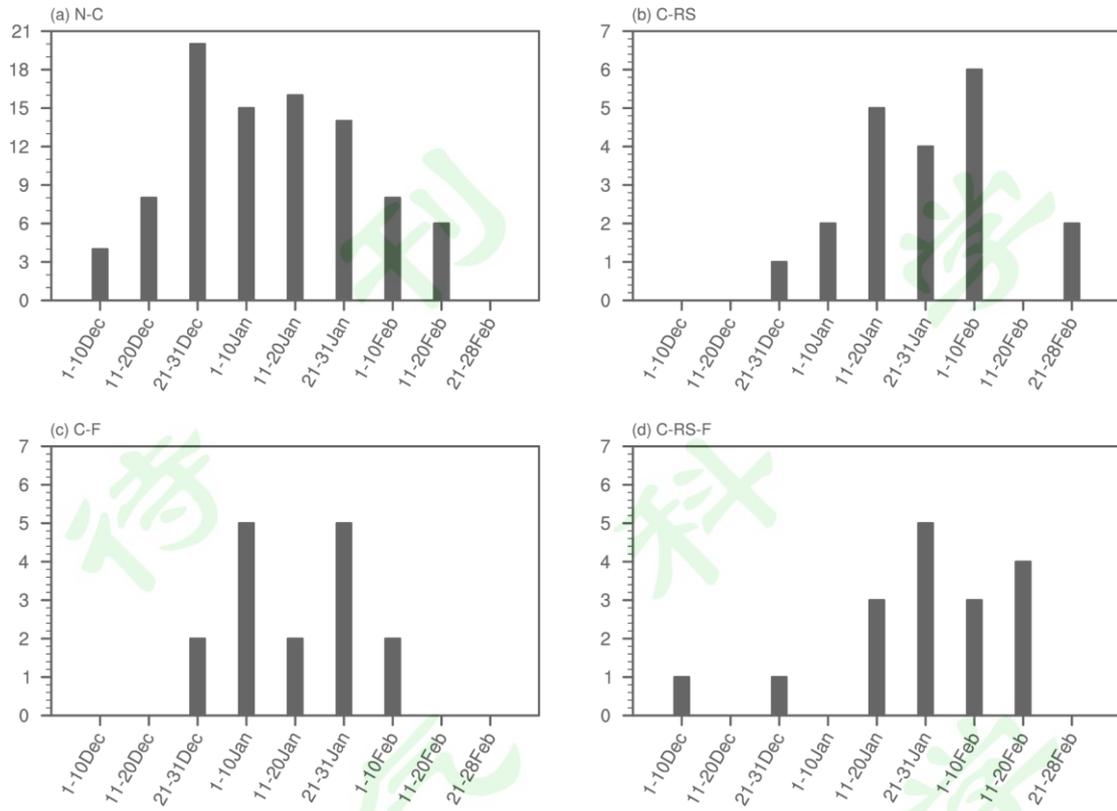


图 5 冬季各旬出现灾害性事件多年累计频数（单位：次）：（a）非组合性低温灾害事件，（b）低温-雨雪灾害事件，（c）低温-冰冻灾害事件和（d）低温-雨雪-冰冻灾害事件。

Fig.5 Cumulative number (units:time) for different disastrous events in every dekad of winter: (a) non-combined cold disaster event, (b) cold-rain/snow disaster event, (c) cold-freezing disaster event and (d) cold-rain/snow-freezing disaster event.

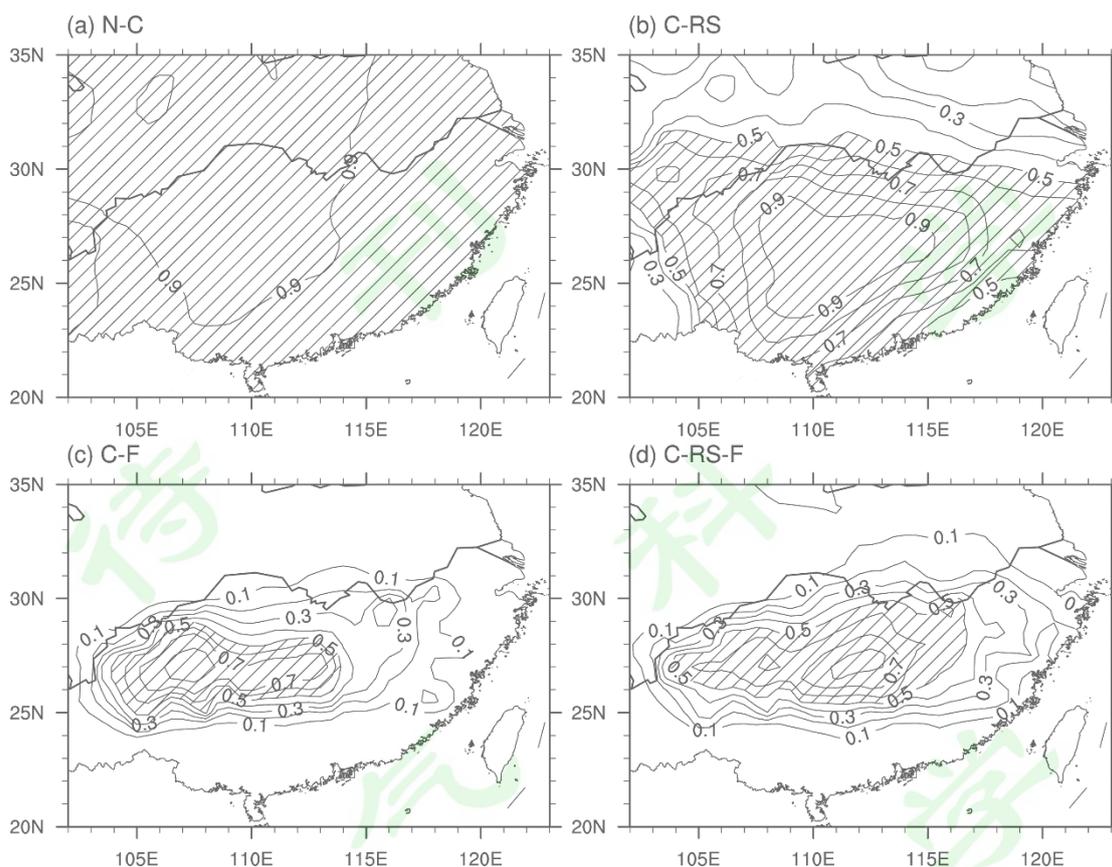


图 6 我国南方地区台站达到灾害性天气标准的次数与灾害性事件总数的比率：
 (a) 非组合性低温灾害事件、(b) 低温-雨雪灾害事件、(c) 低温-冰冻灾害事件
 和 (d) 低温-雨雪-冰冻灾害事件。等值线间隔 0.1，斜线阴影区为比率 $\geq 50\%$ 的
 区域。

Fig.6 Ratio of the number of time that each station meets the disastrous weather standard in southern China to total number of disastrous events: (a) non-combined cold disaster event, (b) cold-rain/snow disaster event, (c) cold-freezing disaster event and (d) cold-rain/snow-freezing disaster event. Diagonal shadings indicate regions with ratio $\geq 50\%$.

5 组合性灾害事件的关键特征及差异

5.1 中高纬大气环流与冷空气活动

首先考察不同组合性灾害事件中高纬大气环流和冷空气活动特征。鉴于不同组合性灾害事件以持续 3 天的个例为多 (表 1)，为此，本文统一取不同组合性

灾害事件发生期间的前 3 天平均场来表征灾害事件情况。

图 7 为 3 类组合性灾害事件的 500 hPa 位势高度及其距平（左列）、海平面气压距平（中列）和地面气温距平（右列）合成分布。可以看出，在低温-雨雪灾害事件期间，如图 7a 所示， 50°N 以北亚洲中高纬地区盛行大型高压脊并对应显著的正异常中心，高压脊向极区伸展。该高压脊东侧偏北气流不断引导冷空气南下并在东亚北部堆积，造成东亚中高纬度地区海平面气压显著加强，对应的正距平中心主要位于西伯利亚地区，强度约 4 hPa。相应的西伯利亚高压主体面积比其冬季平均情况明显偏大，北扩明显，南缘南扩约 3 个纬度左右（图 7b）。我国南方降温明显，最大降温区位于广西、贵州和湖南一带，最大降温幅度约 -3°C ， 0°C 等温线比冬季平均位置略偏南，位于 33°N 附近（图 7c）。上述事实表明，低温-雨雪灾害事件发生时北方冷空气活动适中，并不强烈。

与低温-雨雪灾害事件相比，低温-冰冻灾害事件期间中高纬环流特征发生了很大变化，乌拉尔山以东地区西南/东北走向的大型斜脊取代了亚洲北部高压脊，同时东亚中纬度地区西南/东北走向的大型斜槽异常明显，呈现出明显的大型斜脊-斜槽结构特征（图 7d）。与此同时，西伯利亚高压显著加强，范围扩大，同时南伸也异常明显（图 7e）。对应的我国南方最大降温区虽与低温-雨雪灾害事件大体接近，但降温幅度比后者要大得多，温度距平已达 -5°C ， 0°C 等温线越过长江，到达贵州、湖南中部、江西以及浙江北部一带，比冬季平均位置偏南约 8 个纬度（图 7f）。这表明北方的冷空气活动比低温-雨雪灾害事件期间要强烈得多。上述结果与欧亚大型斜脊斜槽有利于西伯利亚高压高压加强、冷空气南侵和我国南方大范围持续低温事件发生的结论（Bueh et al., 2011a,b; Peng and Bueh, 2012; 符仙月和布和朝鲁, 2013; 布和朝鲁等, 2018; Peng et al., 2021）是相一致的。

低温-雨雪-冰冻灾害事件期间，亚洲北部环流也呈明显大型斜脊特征，强度较弱。与低温-冰冻灾害事件相比，大型斜脊位置更为偏东，斜脊南侧没有形成明显的斜槽或横槽特征（图 7g）。西伯利亚高压显著加强，范围扩大，与低温-雨雪灾害事件和低温-冰冻灾害事件的情况相比，西伯利亚高压主体东扩特征非常明显，其东翼的 1030 hPa 等压线在 45°N 以南接近海陆交界处（图 7h），所对应的气压梯度力和冷平流都较强（图略）。我国南方最大降温区与低温-冰冻灾害

事件大体相近，降温幅度比低温-冰冻灾害事件还要大，达 -6°C ， 0°C 等温线位置更偏南，向南包围范围更广（图 7i）。这说明低温-雨雪-冰冻灾害事件期间北方冷空气活动更强烈，如前所述，这是由于西伯利亚高压主体偏东，北方冷空气主要沿东亚沿岸南下，气压梯度力和冷平流强所致。这一点可通过下面的 925 hPa 风场距平（图 9c）得以证实。

由此可见，大型斜脊系统不仅是影响我国南方低温的关键环流特征（Bueh et al., 2011a,b; 布和朝鲁等, 2013, 2018），也是导致低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件发生的关键环流特征。不同的是，低温-冰冻灾害事件期间大型斜脊位置偏西位于乌拉尔山以东地区，低温-雨雪-冰冻灾害事件期间大型斜脊位置更为偏东位于贝加尔湖附近。低温-雨雪灾害事件期间无明显大型斜脊斜槽特征。

此外，由图 6 和图 7 可以发现，在低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件影响集中的区域（图 6c 和 6d），不仅降温幅度大，而且地面温度都低于或者近乎 0°C （图 7f 和 7i）。这与赵思雄和孙建华（2008）的结论是相一致的，他们认为冻雨发生的适宜地面温度为 $0\sim-3^{\circ}\text{C}$ 。陶诗言和卫捷（2008）将近地面低于 0°C 的空气层称之为“冷垫”，认为“冷垫”和其上空的“暖盖”（逆温层）是冻雨发生的必要条件。显然，冷垫既是低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件的关键特征也是它们发生的必要条件，而低温-雨雪灾害事件发生则无需冷垫。

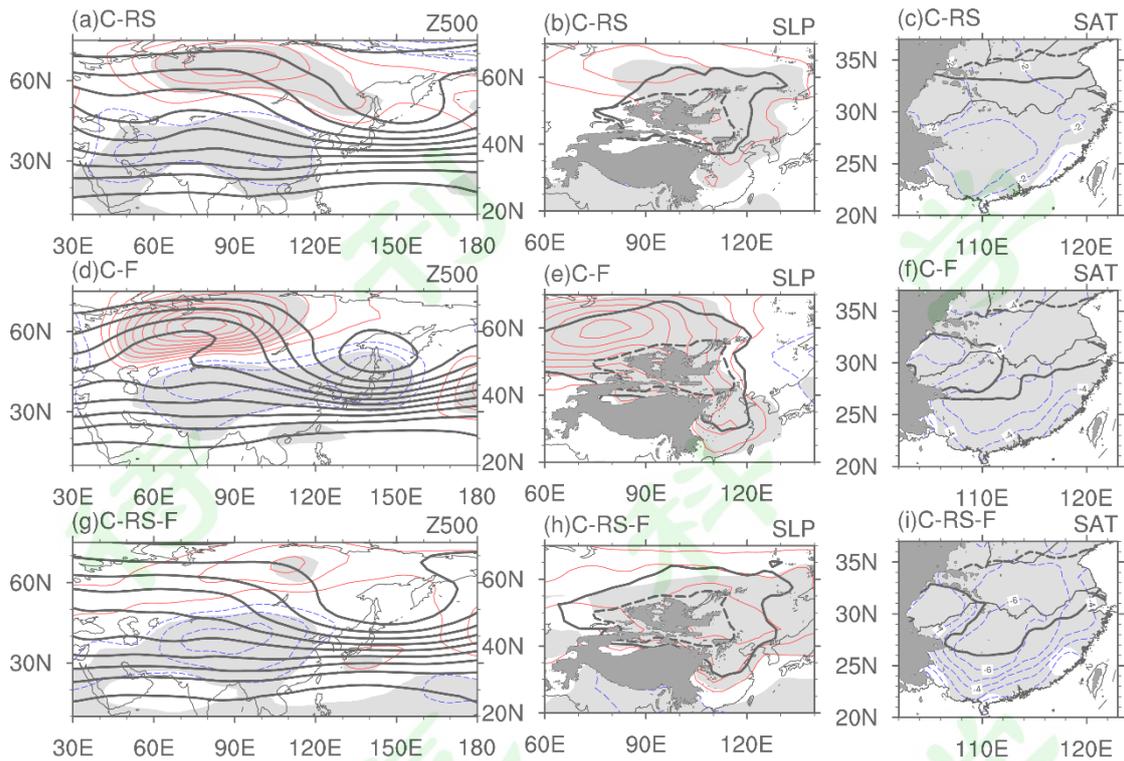


图 7 3 类组合性灾害性事件 500 hPa 位势高度及其距平（左列，单位：gpm）、海平面气压距平（中列，单位：hPa）和地面气温距平（右列，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）合成分布。图中细红（蓝）等值线分别对应正（负）距平，距平零线略。位势高度（SLP、温度）距平的等值间隔分别为 20 gpm（200 hPa、 1°C ）。（a, d, g）中粗黑等值线为位势高度，等值线间隔为 80 gpm。（b, e, h）中粗实（虚）等值线为（冬季平均）1030 hPa 线。（c, f, i）中粗实（虚）等值线为（冬季平均） 0°C 等温线。图中浅灰色阴影区为距平超过 95% 置信度的区域，深灰色区域为海拔高度 $\geq 1500\text{m}$ 的区域。

Fig.7 Composite distributions of 500 hPa geopotential height and its anomalies (left column, units: gpm), SLP and its anomalies (middle column, units: hPa) and temperature anomalies (right column, units: $^{\circ}\text{C}$) of different disastrous weather events. Thin red (blue) contours correspond to positive (negative) anomalies, zero isoline is eliminated. Contour intervals for geopotential height (SLP, temperature) anomalies are 20 gpm (200 hPa, 1°C). Thick contours in (a, d, g) correspond to geopotential height, are drawn for every 80 gpm, the thick solid (dash) lines in (b, e, h) and (c, f, i) represent for 1030 hPa isobar and 0°C isotherm (for climatological winter mean),

respectively. Light gray shadings indicate height (SLP, temperature) anomalies beyond 95% significance level, dark gray shadings indicate regions with the altitude $\geq 1500\text{m}$.

5.2 水汽条件

3类组合性灾害事件期间不仅有低温还伴有降水，因此它们的发生还需具备一定的水汽条件。图8为3类组合性灾害事件的850 hPa和700 hPa水汽通量及其散度距平的合成分布。可以看出，低温-雨雪灾害事件期间，850hPa层（图8a）孟加拉湾至我国南方为强的西南向水汽通量距平，表明由孟加拉湾向我国南方的水汽输送加强。同时，华南至江南南部为大范围强的水汽通量散度负异常且超过了95%置信度，表明该区域对应应有显著的强烈水汽辐合。700 hPa层（图8d），孟加拉湾经中南半岛向我国南方水汽输送也是加强的，只不过大范围强水汽辐合带移到了江南一带。显而易见，充沛的水汽供应和大范围强烈的水汽辐合是低温-雨雪灾害事件的典型特征，同时也是低温-雨雪灾害事件发生的重要条件，孟加拉湾是低温-雨雪灾害事件的重要水汽源地。

低温-冰冻灾害事件期间，850 hPa层（图8b）我国南方的水汽输送主要来自于南海北部并在我国西南以及广西、广东地区辐合。到了700 hPa层（图8e），来自南海的水汽输送大大减弱，辐合区也变得不显著。与低温-雨雪灾害事件相比，无论是水汽通量距平强度和还是水汽通量散度负异常的强度都弱得多。由此可见，低温-冰冻灾害事件对水汽条件要求比低温-雨雪灾害事件弱得多，只需要不太强的水汽供应和水汽辐合即可发生。低温-冰冻灾害事件期间850 hPa层的水汽主要来自于我国南海北部。

低温-雨雪-冰冻灾害事件期间，850 hPa层（图8c）来自孟加拉湾、南海以及西北太平洋地区的气流为我国南方地区提供了充沛的水汽。此外，华南至江南南部地区对应有大范围显著的强水汽通量散度负异常，其强度甚至比低温-雨雪灾害事件期间还要强，表明该地区有强烈的水汽辐合。到了700 hPa层（图8f），由孟加拉湾来、南海以及西北太平洋地区至我国南方的水汽输送加强，同时强水

汽辐合带北抬至江南一带。由此可见，低温-雨雪-冰冻灾害事件同低温-雨雪灾害事件一样，其发生条件也是需要充沛的水汽供应和大范围强烈的水汽辐合，与低温-雨雪灾害事件不同的是，低温-雨雪-冰冻灾害事件的水汽不只来自于孟加拉湾，还来自于南海以及西北太平洋。

综上所述，3类组合性灾害事件中，低温-冰冻灾害事件除外，其它2类组合性灾害事件（低温-雨雪灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件）发生不仅需要充沛的水汽供应还需要有大范围强烈的水汽辐合。3类组合性灾害事件期间我国南方对流层低层暖湿水汽来自不同源地，低温-雨雪灾害事件期间水汽主要来自孟加拉湾，低温-冰冻灾害事件主要来自南海北部，而低温-雨雪-冰冻灾害事件主要来自孟加拉湾、南海和西北太平洋。在5.4节中我们将进一步讨论与这些水汽输送有关的副热带环流异常。

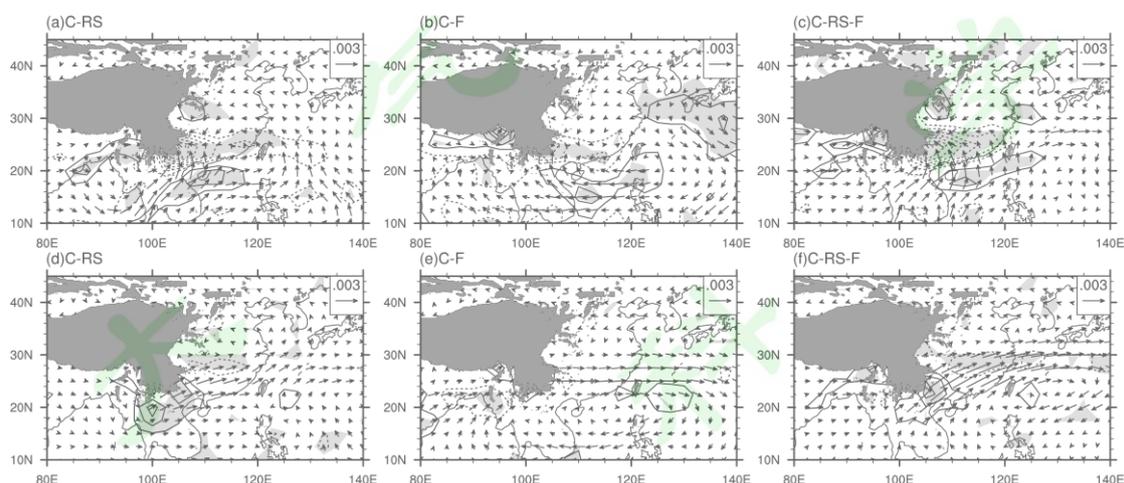


图8 3类组合性灾害性事件850 hPa水汽通量距平（矢量图，单位： $g/s \cdot cm \cdot hPa$ ）及水汽通量散度距平（等值线，单位： $g/s \cdot cm^2 \cdot hPa$ ）合成分布（上图）：（a）低温-雨雪灾害事件，（b）低温-冰冻灾害事件，（c）低温-雨雪-冰冻灾害事件。（d-f）同（a-c），但为700 hPa。浅灰色阴影区为水汽通量散度距平超过95%置信度的区域，深灰色阴影区为海拔高度 $\geq 1500m$ 的区域。

Fig.8 Composite distributions of mean water vapor flux anomalies (vectors, units: $g/s \cdot cm \cdot hPa$) and water flux divergence anomalies (contours, units: $g/s \cdot cm^2 \cdot hPa$) at 850 hPa level during different disastrous weather events (top panels): (a) cold-rain/snow disaster event, (b) cold-freezing disaster event and (c) cold-rain/snow-freezing disaster event. (d-f) same as (a-c), but for 700 hPa level.

Light gray shadings indicate water vapor flux divergence anomalies beyond 95% significance level, dark gray shadings indicate regions with the altitude $\geq 1500\text{m}$.

5.3 对流层下层层结和风场特征

雨雪和冰冻的发生还需要特定的大气层结(何玉龙等, 2007; 陶玥等, 2012), 后者的形成又与高低空风场的配置紧密相关(何玉龙等, 2007; Peng et al., 2021)。为此, 我们考察了 3 类组合性灾害事件期间的对流层下层(925 hPa、850 hPa 和 700 hPa) 0°C 等温线和风场距平配置特征(图 9)。图 9 中红色虚线为 27°N 位置, 大致对应 3 类组合性灾害集中影响区域中心的纬度位置(图 6), 绿(紫)色阴影则分别对应 850 hPa 和 700 hPa 层温度与 925 hPa 层温度的差值 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ (1°C) 的区域。可以发现, 在 3 类组合性灾害事件影响集中区域(图 9 左列), 其 925 hPa 层 0°C 等温线南凸尤为明显, 并对应着强烈的异常偏北风距平, 这说明该区域 925 hPa 层对应应有来自北方的强冷空气侵入, 冷性特征突出。

到了 850 hPa 层(图 9 中列), 在 3 类组合性灾害事件影响集中区域, 其 0°C 等温线均位于 27°N 附近, 但与 925 hPa 层 0°C 等温线位置相比, 低温-雨雪灾害事件略偏南(图 9a), 而低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件则略偏北表明有逆温(图 9b 和 9c)。由 850 hPa 与 925 hPa 温度差值分布可以更清楚地看出, 在低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件影响集中区域, 其 850 hPa 层温度比 925 hPa 层温度明显偏高, 逆温特征十分明显(图 9b 和 9c), 其中低温-雨雪-冰冻灾害事件逆温更强, 两个等压面的最大温度差甚至超过了 1°C (图 9c)。低温-雨雪灾害事件则无逆温特征(图 9a)。3 类组合性灾害事件期间(图 9 中列), 我国南方 27°N 以南地区异常风场均转为异常偏南风, 意味着来自南方的暖湿空气爬升和北上明显, 暖层特征突出, 这为我国南方逆温层的形成提供了有利条件。

到了 700 hPa 层(图 9 右列), 在低温-雨雪灾害事件影响集中的区域其 0°C 等温线比其低层(925 hPa 和 850 hPa)的 0°C 等温线明显偏南(图 9a), 而在低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件影响集中的区域, 其对应的 0°C 等温线与低层(925 hPa 和 850 hPa)的 0°C 等温线位置仍然较为接近(图 9b 和 9c)。通过 700 hPa 层与 925 hPa 层温度差可以发现, 在低温-冰冻灾害事件和低温-雨

雪-冰冻灾害事件影响集中区域，逆温仍然十分明显，只不过逆温区范围比 850 hPa 层要小得多（图 9b 和 9c）。而低温-雨雪-冰冻灾害事件比低温-冰冻灾害事件的逆温区范围更大，逆温更强（图 9c），这进一步表明低温-雨雪-冰冻灾害事件期间逆温更强烈，逆温层更深厚。长江及其以南地区上空异常风场全部转为异常偏南风，表明该层南方的暖湿空气爬升和北上更强烈，暖层特征明显，为我国南方逆温层的形成提供了有利条件。

由此可见，有冰冻伴随的组合性灾害事件（低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件）对流层下层均对应有明显的逆温层结构特征，其中低温-雨雪-冰冻灾害事件期间逆温更强，逆温层更深厚，而低温-雨雪灾害事件则不具备明显的逆温层结构特征。

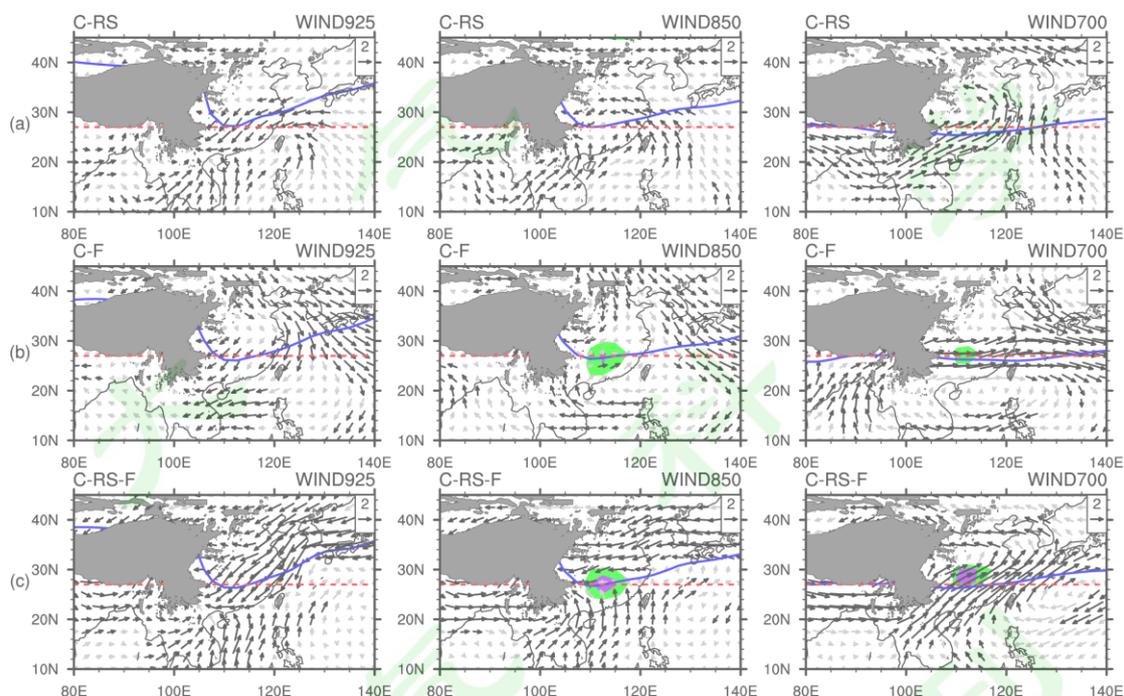


图 9 3 类组合性灾害性事件 925 hPa（左列）、850 hPa（中列）和 700 hPa（右列）风场距平（矢量图）合成分布：（a）低温-雨雪灾害事件 （b）低温-冰冻灾害事件，（c）低温-雨雪-冰冻灾害事件。深灰色阴影区为海拔高度 $\geq 1500\text{m}$ 的区域，蓝实线为 0°C 等温线，红虚线为 27°N 位置，绿（紫）色阴影区对应 850 hPa 层和 700 hPa 层温度与 925 hPa 层温度差值 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ （ 1°C ）的区域，黑矢量箭头对应风场距平矢量分量超过 95% 置信度。

Fig.9 Composite distributions of winds anomalies (vectors, units: m/s) at 925 hPa

level (left panel), 850 hPa level (middle panel) and 700 hPa level(right panel) for three kinds of combined-disastrous weather events: (a) cold-rain/snow disaster event, (b) cold-freezing disaster event and (c) cold-rain/snow-freezing disaster event. Dark gray shadings indicate regions with the altitude $\geq 1500\text{m}$, blue solid lines represent 0°C isotherm, red dash lines correspond to the location of 27°N , the green (purple) shadow areas correspond to the areas where the temperature difference between 850 hPa layer, 700 hPa layer and 925 hPa layer greater than or equal to 0°C (1°C), black vector arrow indicates that the vector component of the corresponding winds anomalies beyond 95% significance level.

5.4 副热带大气环流

由图 9 可进一步发现, 3 类组合性灾害事件期间偏南气流的出现是与不同的副热带异常环流系统有关。低温-雨雪灾害事件期间(图 9a)我国南方上空异常偏南气流实际是孟加拉湾上空异常气旋性环流的一部分, 这在 700 hPa 层上尤为清楚。孟加拉湾异常气旋性环流的出现意味着孟加拉湾上空南支槽系统的加深。在 500 hPa 位势高度及其距平场上(图 7a), 孟加拉湾东侧低压槽及其对应的显著负高度距平中心也表明, 孟加拉湾南支槽偏强。孟加拉湾南支槽是低温-雨雪灾害事件期间向我国南方地区输送暖湿水汽的关键环流系统。

低温-冰冻灾害事件期间(图 9b), 我国南方异常偏南气流实际就是南海上空异常反气旋西北侧的转向气流。另外, 在 500 hPa 高度距平场上(图 7d), 南海上空显著的正高度异常也表明, 南海上空异常反气旋性环流加强。南海上空异常反气旋环流是低温-冰冻灾害事件期间向我国南方地区输送暖湿水汽的关键环流系统, 同时为该地区逆温层形成提供了有利环流条件。南海上空异常反气旋性环流引起的偏南风分量在我国南方地区较弱, 其水汽输送能力明显不如南支槽强。

低温-雨雪-冰冻灾害事件期间(图 9c), 我国南方异常偏南气流实际是孟加拉湾上空异常气旋性环流东侧气流与西北太平洋异常反气旋环流西北侧气流的重叠部分, 该特征在 700 hPa 层上表现得更为清楚。在 500 hPa 位势高度及其距平场上(图 7g), 孟加拉湾上空为低压槽并对应显著的负高度异常表明, 南支槽

加深,同时日本南部显著的正高度异常中心则表明,西北太平洋异常反气旋性环流的加强。可见,孟加拉湾南支槽和西北太平洋异常反气旋是低温-雨雪-冰冻灾害事件期间向我国南方地区输送暖湿水汽的关键环流系统,同时为该地区逆温层形成提供了有利环流条件。

上述结果清楚地表明,3类组合性灾害事件期间,我国南方地区的暖湿水汽供应实际是由不同的副热带关键异常环流系统调控,后者还为我国南方地区逆温层的形成提供了有利环流条件。

6 总结和讨论

本文利用1961—2013年台站观测资料和NCEP/NCAR再分析资料,首先探讨了冬季我国南方大范围持续性低温、雨雪、冰冻事件的客观识别方法,在此基础上进一步探讨了大范围持续性低温、雨雪、冰冻的组合性灾害事件类型及其识别方法,并对3类常见的组合性灾害事件关键特征进行了对比分析。主要结果如下:

(1) 利用百分位方法,分别确定出低温、雨雪、冰冻天气的强度及影响面积阈值并得到大范围低温、雨雪、冰冻的发生日期,根据其持续天数给出了大范围持续性低温、雨雪、冰冻事件各自的客观判识方法。

在此基础上,根据低温、雨雪和冰冻日的同步性及持续天数,给出了它们的组合性灾害事件的客观识别方法以及研究时段内发生的组合性灾害事件。低温-雨雪灾害事件,低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件是我国南方冬季最重要的组合性灾害事件,它们主要出现于1月上旬和2月中旬。

(2) 3类组合性灾害事件虽然均伴有低温和降水,但其发生条件(或特征)却有显著区别:低温-雨雪灾害事件发生需要充沛水汽供应、大范围强烈的水汽辐合,但无需很强的低温、冷垫和逆温层;低温-冰冻灾害事件发生需要更强的低温、冷垫以及逆温层,但只需弱的水汽供应和水汽辐合;低温-雨雪-冰冻灾害事件发生不仅需要充沛的水汽供应、大范围强烈的水汽辐合,还需要更强的低温、冷垫和逆温层。

(3) 亚洲中高纬大型斜脊是低温-冰冻灾害事件和低温-雨雪-冰冻灾害事件的关键环流系统,它们的持续维持为北方冷空气南侵和我国南方冷垫的形成提供

了有利环流条件，不同的是，低温-冰冻灾害事件大型斜脊位于乌拉尔山东部，而低温-雨雪-冰冻灾害事件大型斜脊位置更偏东位于贝加尔湖附近。低温-雨雪灾害事件期间亚洲中高纬主要盛行与适度冷空气相对应的波状环流。

(4) 3 类组合性灾害事件期间，我国南方水汽供应分别由不同的副热带关键环流系统调控。孟加拉湾南支槽和南海异常反气旋分别是低温-雨雪灾害事件和低温-冰冻灾害事件期间向我国南方输送暖湿水汽的关键环流系统，孟加拉湾南支槽和西北太平洋异常反气旋则是低温-雨雪-冰冻灾害事件期间向我国南方地区输送暖湿水汽的关键环流系统。另外，上述副热带关键环流系统也为我国南方地区逆温层的形成提供了有利环流条件。

本文结果清楚地显示了，冬季我国南方大范围持续性低温、雨雪、冰冻事件存在多种组合形式，并形成不同类型的组合性灾害事件。不同组合性灾害事件影响集中区域、低温强度、水汽条件以及关键环流系统等是有显著差异的。这些结果表明，在对冬季灾害性天气事件的预测研究中，对不同的组合性灾害事件加以区分并建立相应的预报方法是非常必要的。

本工作与 Peng et al.(2021)的工作有相似之处。但我们的研究更关注历史上发生的近乎极端的事件，因而事件的强度阈值（图 2）取得比 Peng et al.(2021)的强度阈值（Fig.2）强。这可能是导致了我们的识别出的组合性灾害事件数比 Peng et al.(2021)界定出的事件数少得多的原因。我们的主要结果与 Peng et al.(2021)也有所不同。主要差别有：（1）本文与冰冻有关的组合性灾害事件影响集中区域主要位于江南中西部（图 6c 和 6d），而 Peng et al.（2021）的则更多出现在江淮区域（Fig.6c），这可能是冷空气活动强度不同所致；（2）低温-雨雪-冰冻灾害事件期间亚洲北部的斜脊位于贝加尔湖附近（图 7g），而 Peng et al.(2021)的大范围低温雨雪冰冻事件（ECPFES）期间亚洲北部的斜脊位于乌拉尔山和贝加尔湖之间（Fig.7a），这可能与冷空气主体位置有所不同有关；（3）本文研究表明，低温-冰冻灾害事件发生次数实际并不少，而且它的关键特征与其它组合性灾害事件的区别也是非常显著的。而 Peng et al.(2021)并没有此类组合性灾害事件展开研究。造成上述差别（1）和（2）的主要原因，很可能是由于强度阈值不同导致事件个案数目以及起止日期不同所致。

本文只是探讨了组合性灾害事件的关键特征,意在揭示不同组合性灾害事件发生的有利条件(如冷空气强度、水汽供应及辐合、层结结构及关键环流配置),但对于关键环流配置发展演变季节内尺度特征、不同组合性灾害事件季节内活动差异以及不同组合性灾害事件年际活动变化等问题,限于篇幅本文并未探究。我们下一步工作将揭示不同组合性灾害事件的环流演变特征及其动力学机理,给出它们关键前兆信号及其异同点,并对其季内及年际活动特征作进一步探讨。

参考文献 (References)

- 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 I: 亚非副热带急流低频波 [J]. 气候与环境研究, 13(4):419—433. Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi Ning. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008 Part I: Low-frequency waves embedded in the Asian-African subtropical jet [J]. Climatic and Environ. Res. (in Chinese), 13(4): 419—433.
- Bueh Cholaw, Shi Ning, Xie Zuowei. 2011a. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over Southern China in January 2008 [J]. Atmos. Sci. Lett., 12(3): 273—280.
- Bueh Cholaw, Fu Xianyue, Xie Zuowei. 2011b. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett, 4(4):235—241.
- 布和朝鲁, 彭京备, 谢作威, 等. 2018. 冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊斜槽系统研究进展 [J]. 大气科学, 42(3):656—676. Bueh Cholaw, Peng Jingbei, Xie Zuowei, et al. 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian Continent [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3):656—676.
- 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等. 2008. 2008 年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害形成的温度场结构分析 [J]. 气象学报, 66(6):1043—1052. Zeng Mingjian, Lu Weisong, Liang Xinzong, et al. 2008. Analysis of temperature structure for persistent disasterous freezing rain and snow over southern China in early 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(6):1043—1052.
- 陈伟, 杜小惠, 王德良, 等. 2008. 2008 年初低温、雨雪、冰冻灾害的成因分析 [J]. 气象科学, 28(增刊):84—87. Chen Wei, Du Xiaohui, Wang Deliang, et al. 2008. Analysis of the low temperature, ice-snow and freezing disasters in early

- 2008 [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28(supplement):84—87.
- 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 Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(5):808—825.
- 符仙月, 布和朝鲁. 2013. 中国大范围持续性低温事件与中国南方降水异常 [J]. *大气科学*, 37(6):1247—1260. Fu Xianyue and Bueh Cholaw. 2013. Wintertime extensive and persistent low-temperature events of China and anomalous precipitation over southern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(6):1247—1260.
- 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 Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in south China during January 2009: II. Possible climatic causes [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 34(4):101—106.
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系 [J]. *气候与环境研究*, 13(4):405—418. Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asia monsoon system [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13(4):405—418.
- 纪立人, 布和朝鲁, 施宁, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 III: 青藏高原-孟加拉湾气压槽 [J]. *气候与环境研究*, 13(4):446—458. Ji Liren, Bueh Cholaw, Shi Ning, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008 Part III: Pressure trough over the Tibetan Plateau/Bay of Bengal [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13(4):446—458.

- 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 Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(2):113—122.
- 李杰, 郭学良, 周晓宁, 等. 2015. 2011~2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析 [J]. 大气科学, 39 (5): 1038-1048. Li Jie, Guo Xueliang, Zhou Xiaoning, et al. 2015. Characteristics of freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog in China from 2011 to 2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 1038-1048, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14239.
- 马晓刚. 2009. 2008 年 1 月我国南方罕见冰冻雨雪灾害性天气诊断分析 [J]. 气象与环境学报, 25(1):23—26. Ma Xiaogang. 2009. Diagnosis of catastrophic freezing rain and sleet in January 2008 in the southern China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 25(1):23—26.
- Kalnay E, Kannamitsu M, Kistler R, et al. 1996. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437—471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- 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 Jingbei, Sun Shuqing. 2019. Formation of rainy and snowy weather in South China in January 2018 and its relationship with the abnormal East Asian winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6):1233—1244.
- Peng Jingbei, Bueh Cholaw. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 4(5):281—286.
- Peng Jingbei, Bueh Cholaw, Xie Zuowei. 2021. Extensive cold-precipitation-freezing events in southern China and their circulation characteristics [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(1):81—97.
- 钱维宏, 张宗婕. 2012. 南方持续低温冻雨事件预测的前期信号 [J]. 地球物理学报, 55(5):1501—1512. Qian Weihong and Zhang Zongjie. 2012. Precursors to predict low-temperature freezing-rain events in southern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(5):1501—1512.

- 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 II: 西太平洋副热带高压的特征 [J]. 气候与环境研究, 13(4):434—445.
- Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008 Part II: Characteristics of the western Pacific soubtropical high [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4):434—445.
- 孙建华, 赵思雄. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 13(4):510—519. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008. Numerical simulation on stratification and surface ffeatures of freezing rain and snow storm over southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4):510—519.
- 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 Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4):337—350.
- 陶玥, 史月琴, 刘卫国. 2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征 [J]. 大气科学, 36(3):507—522. Tao Yue, Shi Yueqin, Liu Weiguo. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(3):507—522.
- 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 Ling, Gao Ge, Zhang Qiang, 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 (in Chinese), 34(4):95—100.
- 王遵娅. 2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析 [J]. 大气科学, 35(3):411—421. Wang Zunya. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(3):411—

421.

赵珊珊, 高歌, 张强, 等. 2010. 中国冰冻天气的气候特征 [J]. 气象, 36(3):34—38.

Zhao Shanshan, Gao Ge, Zhang Qiang, et al. 2010. Climate characteristics of freezing weather in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36(3):34—38.

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 Sixiong, Sun Jianha. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over Southern China during January-February 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4):351—367.

Zong Haifeng, Bueh Cholaw, Ji Liren. 2014. Wintertime extreme precipitation event over southern China and its typical circulation features [J]. Chinese Science Bulletin, 59(10):1036—1044.

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. Z. Zong, et al. 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39(7):813—820.