

中国冻雨潜在发生指数在数值产品中的推广应用

牛璐^{1,2}, 王国复³, 黄菲^{1,2,4}(1. 中国海洋大学物理海洋实验室, 山东 青岛 266100; 2. 山东省高校海洋-大气相互作用与气候重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 国家气候中心, 北京 100081; 4. 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315211)

摘要: 根据冻雨发生时特定的地面温度、地面湿度及高空温度三个基本特征, 定义了中国冻雨潜在发生指数 (FRGPI) 并进行了初步验证。在此基础上利用欧洲中心 ERA-Interim 再分析及模式预报产品, 结合 2013/2014 年冬季冻雨发生情况, 对中国冻雨潜在发生指数进行了推广应用。结论如下: 2014 年 2 月上旬, 高空槽、中低层切变线、低空急流及暖湿气流的共同作用, 造成了中国南方产生冻雨的适宜的地面温度 t 、温度露点差 D 及高空温度层结 Er , 因此出现大范围冻雨灾害。2 月中旬贵州受西南低涡及暖湿气流影响, 也产生了适宜的 t 、 D 及 Er 条件, 遭受了持续性冻雨灾害。2013/2014 年冬季期间, 适宜冻雨的温度 t 集中在冬季寒潮过程中 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线所在地区, 温度露点差 D 集中在西南暖湿气流影响区域, 高空温度层结 Er 集中在中高纬与低纬天气系统交界地带; 三部分交叉区域则为冻雨高发地带, 且地面温度露点差可能是制约冻雨分布的主要因素。将 FRGPI 指数与欧洲中心数值预报产品相结合发现, 可以提前 10 d 有效地对冻雨灾害进行预报, 对防灾减灾有一定的实用性。

关键词: 冻雨; 冻雨潜在发生指数; ECMWF 模式; 预报

中图分类号: P426.63

文献标识码: A

文章编号: 1673-7148(2015)02-0092-10

引言

冻雨是指由过冷水滴组成的与低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的物体碰撞立即冻结的降水。处于过冷状态的雨滴落到温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的物体上时, 可以立刻冻结成外表光滑而透明的冰层, 称为雨凇^[1]。通常来说, 当较强冷空气南下遇到暖湿气流时, 冷空气像楔子一样插入到暖空气下方, 暖湿空气被迫抬升, 成云致雨或雪。雪花落下经暖层融化(或者是低层毛毛雨直接落下), 由于近地面温度较低, 雨滴呈过冷水状态, 落到物体上迅速冻结, 从而形成冻雨^[2]。正因这一特性, 严重的雨凇会压断树木, 危害农作物; 压断电线和电线杆, 造成通讯和电力中断; 还会妨碍公路铁路交通, 威胁飞机的飞行安全。随着经济的发展, 冻雨作为一种重要气象灾害对交通、电力、通讯、农业和林业等重点行业, 以及人民日常生活的影响也越来越大。

早期针对冻雨研究较少, 主要是局地及个例分

析^[3-7]。2008年1月至2月, 中国南方遭受了大范围的雨雪冰冻灾害, 此次灾害对人民的日常生活造成了严重影响^[8-9]。很多学者对此次灾害的环流背景、静止锋与层结结构、温湿度场与各气候因子的关系等方面进行了研究^[2, 10-18]。此后越来越多的学者开始关注冻雨灾害。研究冻雨的预报方法, 提高冰冻雨雪灾害的预报能力, 对于防灾减灾意义重大。近年来, 针对冻雨的识别预报也有一些研究成果^[19]。美国及加拿大等气象部门通常利用 700—850 hPa、850—1000 hPa 位势厚度等要素进行识别, 但并不适用于我国。漆梁波等^[20]针对我国东部海拔小于 400 m 区域提出一种识别判据。高守亭等^[21]针对贵州冻雨提出三步判别法, 需要预报员首先分析天气图, 进而利用探空资料进行判别。王遵娅等^[22]根据地面温度构建了我国冰冻日出现的判别模型。整体来说, 冻雨的识别预报仍较复杂且困难。

冻雨、冰粒及雨夹雪都可能造成严重的冰冻灾害。对此, 本文用尽可能简单且常规的气象要素构

收稿日期: 2014-12-03; 修订日期: 2015-01-30

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406017); 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2015CB953904, 2012CB955604); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406401)资助

作者简介: 牛璐(1990-), 女, 山东淄博人, 硕士, 从事气候变化方面的研究。E-mail: huangf@mail.ouc.edu.cn

造了一个新的冻雨潜在生成指数,用以直观地表现以冻雨为主的雨雪冰冻灾害的潜在发生可能,并用于模式产品的后处理,得到可能发生冰冻灾害的区域,为预报员进一步预报打基础。研究发现,特定的地面温度、湿度及特定的高空温度分布是冻雨灾害产生时的三个基本特征。在此基础上,我们定义了中国冻雨潜在发生指数(Freezing Rain Genesis Potential Index,简称 FRGPI),并利用实测数据对该指数的实用性进行了初步检验^①。本文利用该冻雨指数,结合欧洲中心再分析及模式预报资料,对 2013/2014 年冬季我国冻雨过程作了进一步分析,进而对

冻雨指数在再分析资料和模式预报产品中的适用性进行了验证。

1 资料与方法

1.1 资料

本文所用实测资料为 GTS 地面天气现象数据,筛选后共 2385 站,该资料时间连续性较差。时间长度为 2013 年 11 月 1 日—2014 年 3 月 31 日,时间间隔为 6 h。经统计,期间共有 82 个台站有冻雨观测(图 1)。台站位置分布如图 1a 所示。

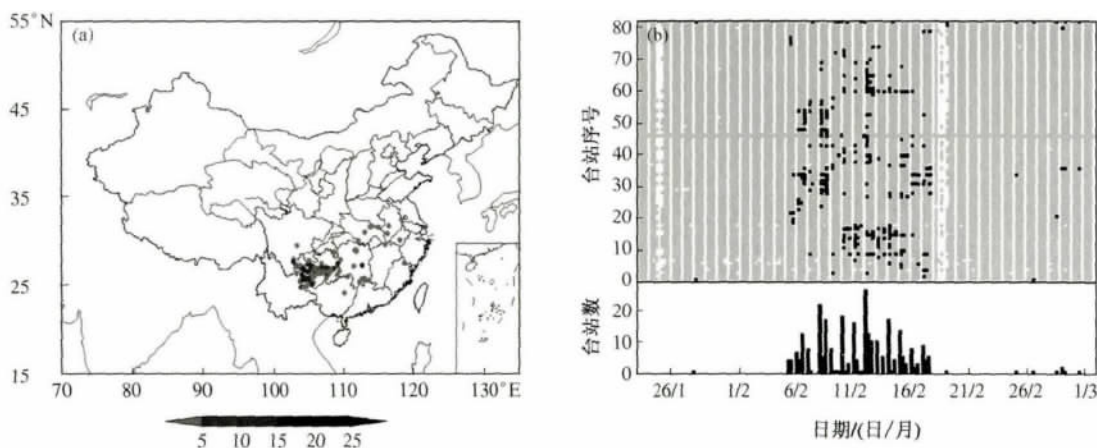


图 1 2013 年 11 月—2014 年 3 月中国 82 站冻雨日数分布 (a) 及 2014 年 2 月冻雨发生情况 (b 上,黑色表示冻雨灾害,白色表示缺测) 及总冻雨站数 (b 下) 随时间的演变

本文所用模式数据为欧洲中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 再分析资料及数值预报产品。再分析资料为与实测资料对应时刻的全球数据,格点分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。预报产品为东亚地区当日 00 时、12 时(UTC)及未来 1~10 d 的预报值,格点分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。所用气象要素包括地面 2 m 温度、2 m 露点温度、地面气压、高空 400 hPa 以下各层温度及位势高度等。

1.2 中国冻雨潜在发生指数定义

特定的地面温度、湿度及高空温度是产生冻雨的三个基本特征。对这些要素进行统计发现,冻雨发生时地面气温集中在 $-7.0 \sim 0.9^\circ\text{C}$, 温度露点差主要为 $0.0 \sim 2.5^\circ\text{C}$; 高空多存在逆温层,在对流层中下层随高度升高,气温在某一特定值上下波动,达到某一高度后,气温随高度递减。

对此,高空引入 σ 坐标,规定

$$\sigma = \frac{p - p_0}{p_s - p_0}$$

其中 p 为高空气压, p_s 为地面气压, $p_0 = 400 \text{ hPa}$ 。

高空气温随高度整体呈先升高后降低的变化规律,用三次函数进行拟合,得到拟合曲线:

$$t = b_0 + b_1\sigma + b_2\sigma^2 + b_3\sigma^3$$

其中 b 为拟合系数, $b_0 = -19.40502$, $b_1 = 43.92174$, $b_2 = -24.51943$, $b_3 = -4.752348$; t 为气温。该曲线类似冻雨发生时的平均层结曲线。

类似均方差定义,定义实际温度廓线与拟合温度曲线的偏差:

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \hat{t}_i)^2}{n}}$$

其中 \hat{t}_i 为不同气压时拟合得到的温度值, t_i 为该层气压实际温度值, n 为气压层数。冻雨发生时,95% 以上的 Er 值都在 $0.8 \sim 8.5^\circ\text{C}$ 的范围内。

^①牛璐,黄菲,王国复. 一个新的中国冻雨潜在发生指数的建立. 投稿

因此,规定

$$Er' = \begin{cases} \frac{Er - Erz}{Er_{max} - Erz} & (Er > Erz) \\ \frac{Erz - Er}{Erz - Er_{min}} & (Er < Erz) \end{cases}$$

其中 $Erz = 3.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为中位数; Er_{max} 和 Er_{min} 为临界值 $Er_{max} = 8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $Er_{min} = 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若 Er' 的值 ≤ 1 , 则认为满足冻雨的高空温度条件, 若 > 1 则不满足。

同理,规定

$$t' = \begin{cases} \frac{t - tz}{t_{max} - tz} & (t > tz) \\ \frac{tz - t}{tz - t_{min}} & (t < tz) \end{cases} \quad D' = \begin{cases} \frac{D - Dz}{D_{max} - Dz} & (D > Dz) \\ \frac{Dz - D}{Dz - D_{min}} & (D < Dz) \end{cases}$$

其中 $tz = -1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{max} = 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t_{min} = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$; D 为温度露点差 $D = t - t_d$ $Dz = 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ $D_{max} = 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $D_{min} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若 t' 及 D' 值均 ≤ 1 , 则认为满足冻雨发生的地面气温及温度露点差条件, 否则不满足。

因此中国冻雨潜在发生指数定义为

$$CZRI = \max\{t', D', Er'\}$$

若该值 ≤ 1 , 即三个条件均在一定的阈值内, 则认为满足冻雨的三个基本条件, 冻雨有潜在发生可能。

2 FRGPI 在中国的适应性验证

2014 年 2 月, 安徽、湖北、湖南、贵州、江西等地均遭到冻雨天气的侵袭。具体来说, 2014 年 2 月 5 日 14 时, 安徽中部观测到冻雨灾害; 之后 20 时, 湖

北东北部出现冻雨。2月6-9日, 湖南及贵州中部出现大范围冻雨。10-16日, 冻雨集中在贵州西部。17日, 贵州东部及湖南、江西部分地区再次出现冻雨。该过程中各台站发生情况随时间的变化如图 1b 所示。

本文利用中国冻雨潜在发生指数 FRGPI, 结合欧洲中心再分析资料, 从 FRGPI 的三个基本条件(即地面气温 t 、地面温度露点差 D 、高空层结 Er), 分别对冻雨过程进行了分析。

对比实测天气现象发现, 2月4-9日中国中东部先后出现两次大范围雨雪天气过程, 中国南方较大范围冻雨过程在此背景下产生。分析其环流形势发现, 500 hPa 位势高度图上(图 2a) 2月上旬亚洲中高纬大气环流形势为两槽一脊型^[23]。乌拉尔山以东至里海一带上空有闭合的冷低压维持, 该低涡不断甩出冷空气, 使新疆及甘肃等省上空不断有小槽自西北向东南方向移动; 南支槽不明显。对流层中下层 700 hPa(图 2b) 有自甘肃南部向云南地区延伸的切变线, 西南气流向东北覆盖至整个南方地区, 带来南部的暖湿空气。850 hPa 上(图 2c) 中国中西部地区有闭合的低涡存在, 华南地区上空还存在西南低空急流(图 2d)。在北部东移的高空槽与南部切变线、暖湿气流的共同作用下, 产生了此次大范围持续的雨雪天气过程。地面 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 等温线在江苏、安徽、湖北、四川一带南北波动, 以北为雪, 以南为雨, 交界地带为雨夹雪或冻雨。

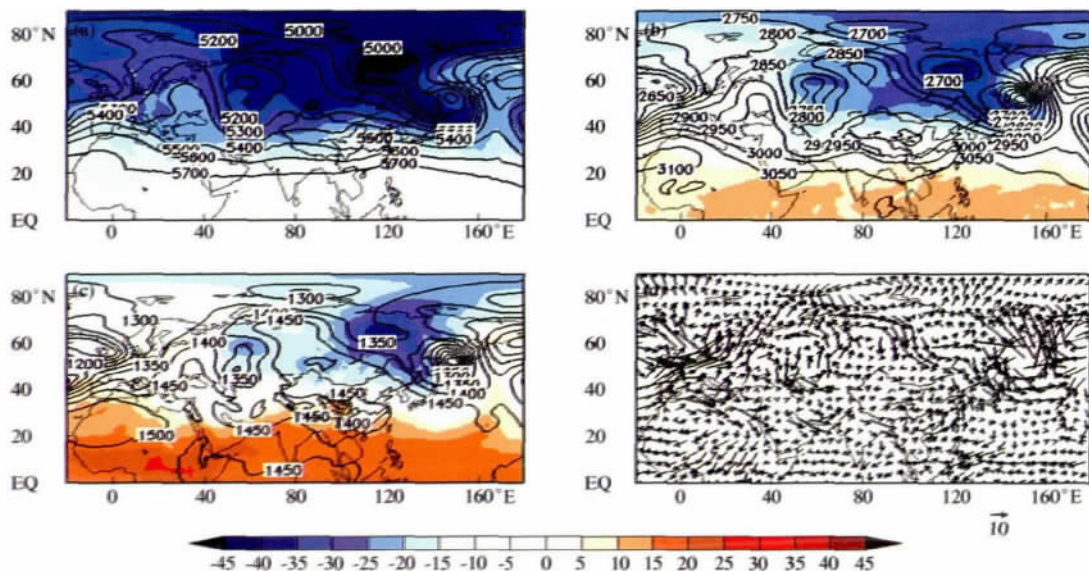


图 2 2014 年 2 月 6 日 08 时高空 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 温度、位势高度场及 850 hPa 风场 (d) 温度单位: $^{\circ}\text{C}$, 位势高度单位: gpm, 风速单位: m/s, 下同

利用 2014 年 2 月 6 日相关资料,分析 FRGPI 各项指标(图 3)。由图 3b 知,受北部冷空气影响,适宜冻雨的温度条件集中在山东、安徽北部、湖北、湖南北部、陕西、甘肃及以北地区。受西南暖湿气流影响,适宜的温度露点差条件集中在江苏、湖南、湖北、贵州等南部地区(图 3c)。适宜的高空条件集中在

中国中高纬与低纬天气系统交界地带(图 3d)。三部分交界区域则为冻雨高发地带,此区域也同时为雨夹雪现象的高发地带。冻雨的产生,还可能与地形、风速及更苛刻的高空层结等有关,因此需要参考更多气象要素对上述区分进行甄别。

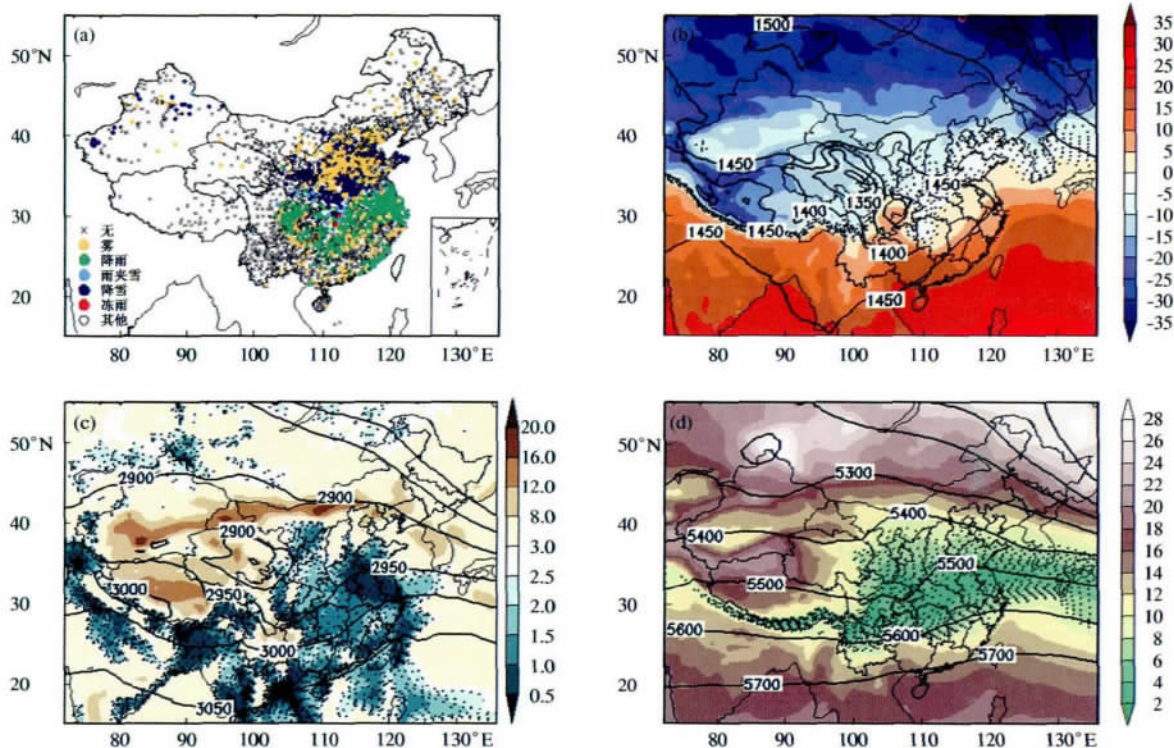


图 3 2014 年 2 月 6 日 08 时天气现象 (a)、地面 2 m 气温及 850 hPa 位势高度场 (b)、地面温度露点差及 700 hPa 位势高度场 (c)、 E_r 及 500 hPa 位势高度场 (d)
(b)、(c)、(d) 图中点线区域分别为 $t' < D'$ 、 E_r 值 ≤ 1 的区域; 温度露点差单位: $^{\circ}\text{C}$ (下同)

分析 10-16 日冻雨过程的环流背景发现,700 hPa 上空一直维持的西南涡与西南暖湿气流相结合,造成贵州及四川一带的降水现象。2 月 12 日 08 时天气图资料分析结果表明(图 4),贵州地区地面气温适宜冻雨产生,且温度露点差为 $0.00 \sim 0.25^{\circ}\text{C}$,高空条件 E_r 也满足,因此遭受了持续的冻雨灾害。而四川盆地海拔较低,虽湿度与高空层结条件满足,但地面气温较高,因此主要为降水;甘肃南部则因高空层结条件不满足而主要为雪。

为进一步分析地面气温、地面温度露点差及高空温度层结对我国冻雨产生情况的相对重要性,本文统计了 2013 年 11 月-2014 年 3 月期间不满足 FRG-PI 各基本条件的频数的概率分布(图 5)。由图 5a 可知:从地面气温看,中国南部沿海、青藏高原北侧地区及四川盆地最不易产生冻雨;辽宁、河北、山西、陕西中部、甘肃南部、四川西部及新疆地区最易满足

温度条件,其次是长江中下游及云贵高原地区,该区域与中国冬季寒潮过程 0°C 等温线分布一致。从地面温度露点差看(图 5b),中国西北部地区最不易产生冻雨,其次是中国北方大部地区;贵州、四川中东部、云南东部及长江中下游一带较容易满足产生冻雨的湿度条件,主要是由于受西南涡及西南暖湿气流的影响。从高空温度层结看(图 5c),黄河以南及长江沿岸地带最易满足冻雨产生的高空条件,青藏高原东南部满足条件的概率最高,中高纬度及低纬度天气系统在此区域交汇。综上,贵州及邻近地区由于海拔较高,且受西南涡及西南暖湿气流影响最重,再加上冷空气影响,成为冻雨的高发地带。

通过比较 D' 、 E_r 所占概率及冻雨观测的空间分布发现,图 5b 的空间分布与冻雨观测的空间分布较一致,因此地面温度露点差可能为冻雨分布的主要制约因素。

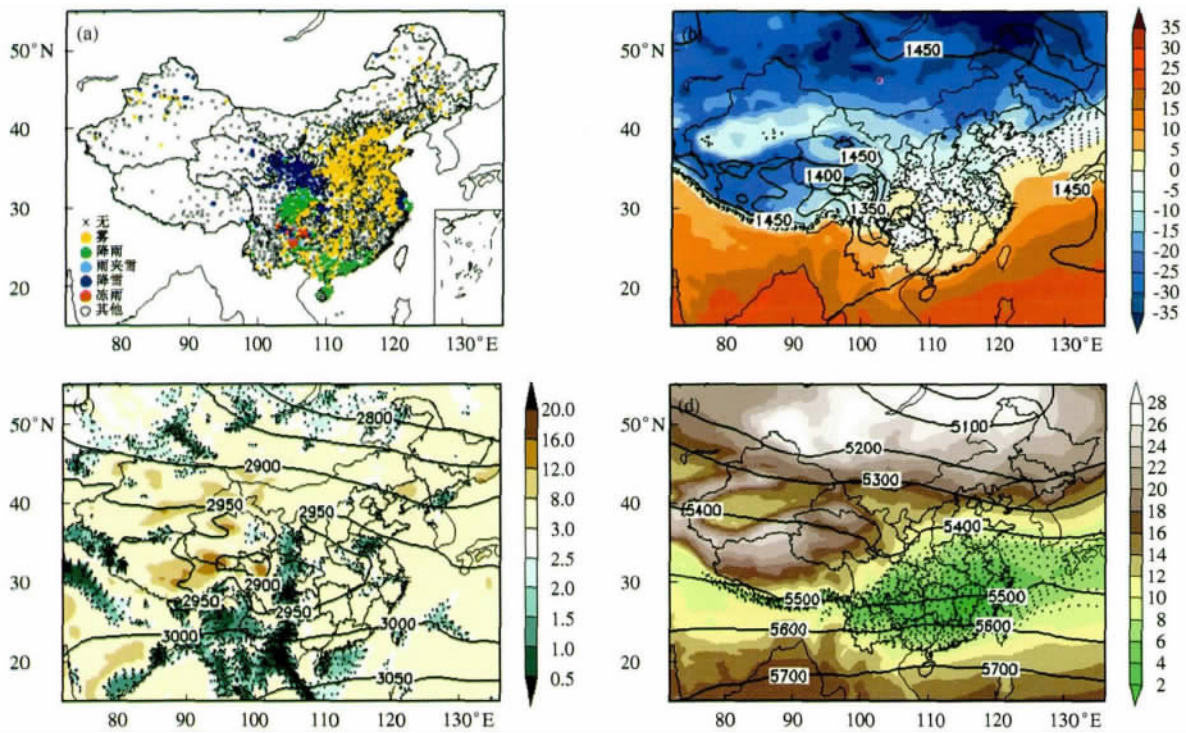


图 4 2014 年 2 月 12 日 08 时天气现象 (a)、地面 2 m 气温及 850 hPa 位势高度场 (b)、地面温度露点差及 700 hPa 位势高度场 (c)、 Er 及 500 hPa 位势高度场 (d)
(b)、(c)、(d) 图中点线区域分别为 t' 、 D' 、 Er 值 ≤ 1 的区域

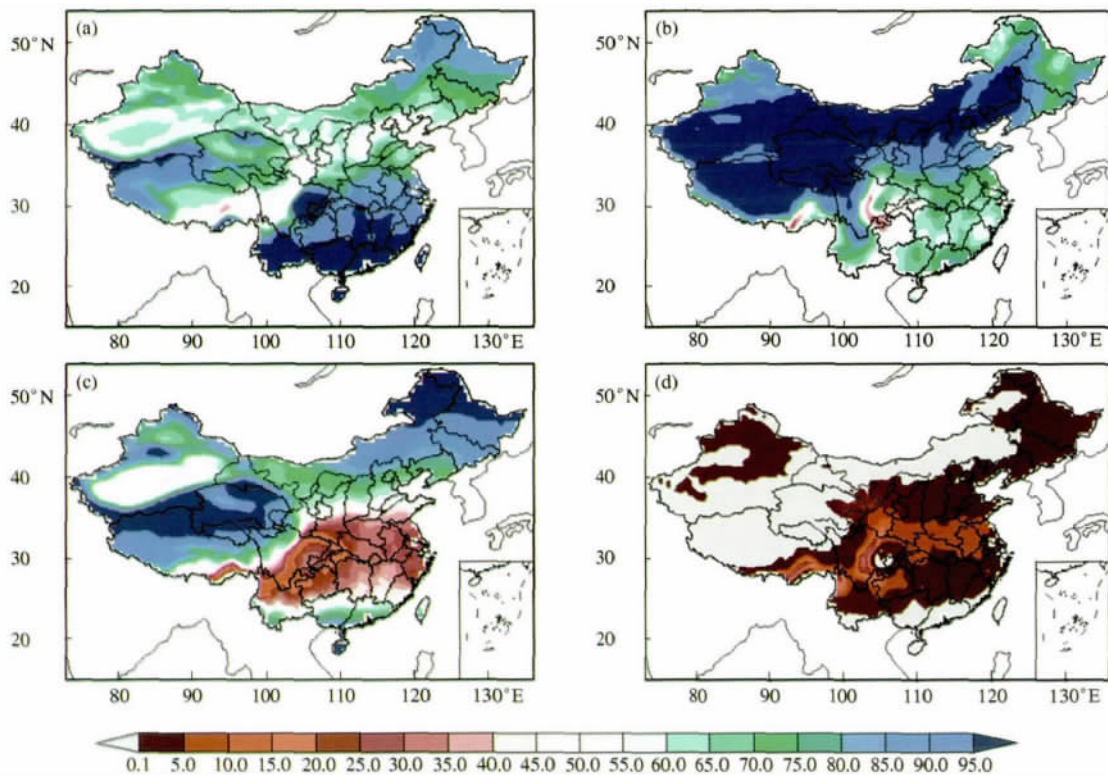


图 5 2013 年 11 月—2014 年 3 月 t' (a)、 D' (b)、 Er (c) 值 > 1 所占概率的空间分布及 FRGPI 值 ≤ 1 (d) 所占概率的空间分布

3 基于 FRGPI 指数和 ECMWF 资料的 中国冻雨灾害预报

利用实测数据初步检验发现,FRGPI 能够很好地表征冻雨的潜在发生可能,对冻雨过程能够进行有效的预报。由于我国探空台站个数、观测时次及高空层数均较少,因此将 FRGPI 与模式资料相结合可以有效地提高其时空精度。若模式预报的地面气温场及露点温度场准确性较高,则可以在此基础上计算 FRGPI 值,进而提前 10 d 对冻雨灾害进行预报。相比日本模式和 T639,ECMWF 模式对主要的

天气系统及气温等气象要素的预报最接近分析场^[24],且中高纬度冬季预报效果相对较好,因此本文选用 ECMWF 预报场进行分析^[25-26]。

2013 年 12 月 10 日,贵州威宁开始遭受冻雨灾害。此后至次年 2 月,中国南方相继遭受冻雨天气侵袭。其中,12 月 22 日至次年 1 月 1 日期间,贵州西部及四川、云南、贵州交界地带发生了持续时间较长的冻雨灾害,对交通、运输及人民的正常生活均造成严重影响。图 6 为 2013 年 12 月天气现象分布。从图 6 中可以看出贵州西部地区有持续的大范围的冻雨天气,同时其北部和南部地区还伴随着降雨。

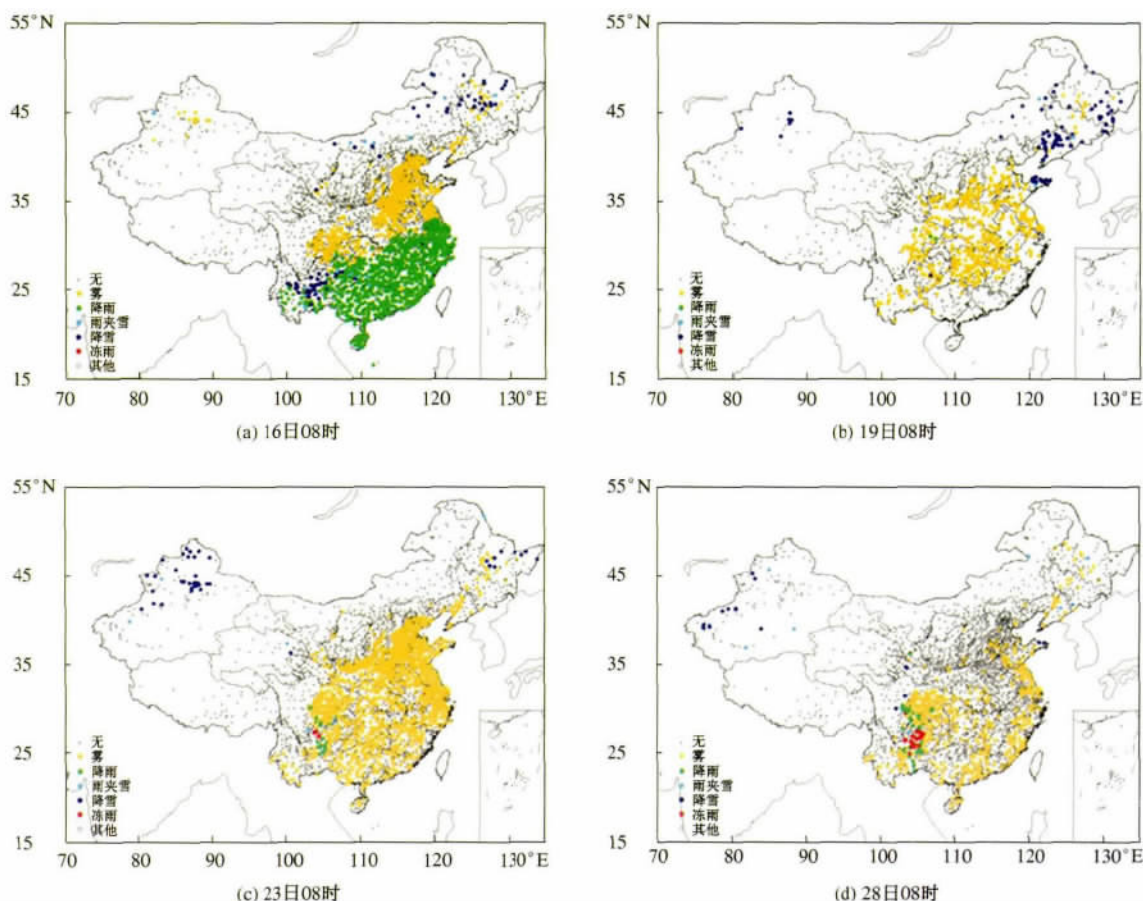


图 6 2013 年 12 月天气现象分布

本文利用欧洲中心模式预报场算得的 FRGPI,与 2013 年 12 月 10 日至 1 月 31 日间的冻雨现象的观测值进行了对比,针对模式数据提前 10 d 至 1 d 的预报能力进行了检验。结果表明,对于贵州 12 月 22 日至 12 月 31 日发生的冻雨,FRGPI 能够很好地判断出冻雨落区及冻雨发生时间,对冻雨灾害能够提前 10 d 进行预报,提前 7 d 的冻雨落区预报更为准确。预报时效越短,预报效果越好。如图 7 所示,贵州、四川及云南交界地带提前 10 d 就可观测到 $FRGPI \leq 1$ 的区域,随预报时效缩短,该区域一直存

在,与适宜的水汽等条件的结合下该区域产生冻雨。

因此,将 FRGPI 应用到实际的模式预报中,可以有效地预报冻雨灾害的产生,预报过程中与降水预报相结合可以大大提高准确程度。如图 8 所示,在 2013 年 12 月 19 日的 FRGPI 指数图中,陕西南部、湖北西部、湖南西部及贵州东部等地 FRGPI 数值均 ≤ 1 ,表明这些地区有适合冻雨产生的地面条件及高空温度层结。但此时中国整个区域没有降水(如图 6b),因此也没有冻雨产生。

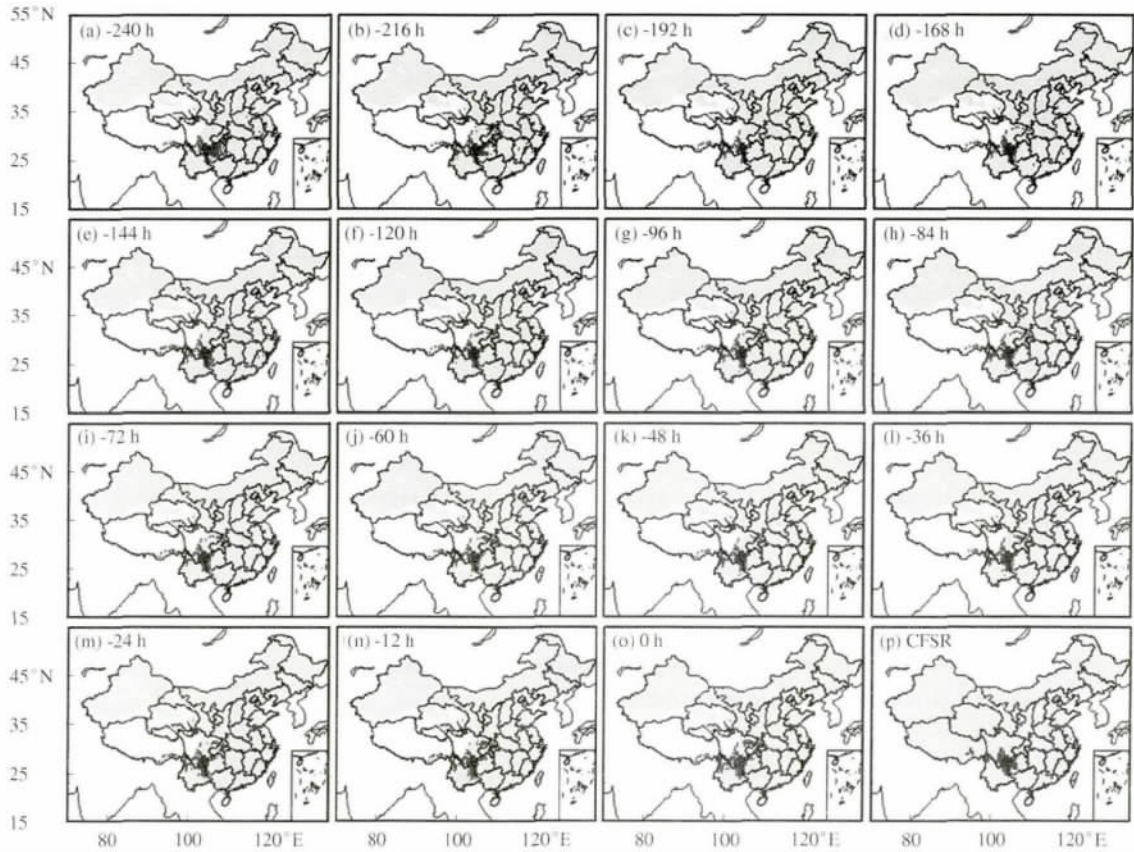


图 7 2013年12月23日08时 FRGPI 场提前240 h 至12 h 预报(a-n) 和再分析资料算得的 FRGPI 场(o-p)
(o) 为 ECMWF 资料 (p) 为 CFSR 资料; 阴影为 FRGPI ≤ 1 的区域,下同

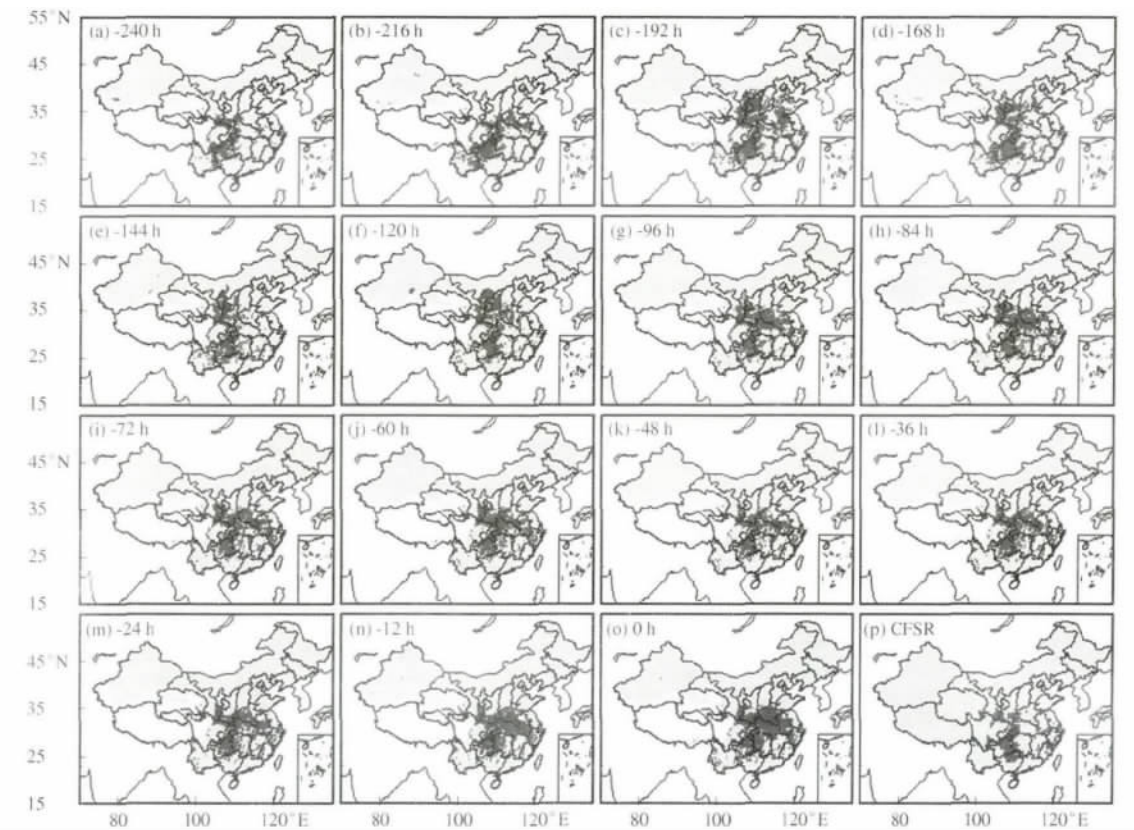


图 8 2013年12月19日08时 FRGPI 场提前240 h 至12 h 预报(a-n) 和再分析资料算得的 FRGPI 场(o-p)

值得注意的是,2013年12月13—17日,中国南方长江以南大部地区均出现了较大范围的冬季降水过程。对比期间的FRGPI图,13—15日在贵州西部与四川东南部交界地带、16日在云南东部及贵州中部(图9)、17日在贵州中东部及浙江安徽交界地区,均出现了FRGPI值 ≤ 1 的区域。而对应实况图中除13

日贵州西部出现冻雨灾害外,其他时刻并没有冻雨观测。分析发现,这些地区天气现象主要为雨夹雪,且处于降雨与降雪交界地带(图6a)。对这些交界地带的区分还有待于更细致指数的定义和更深入的研究。

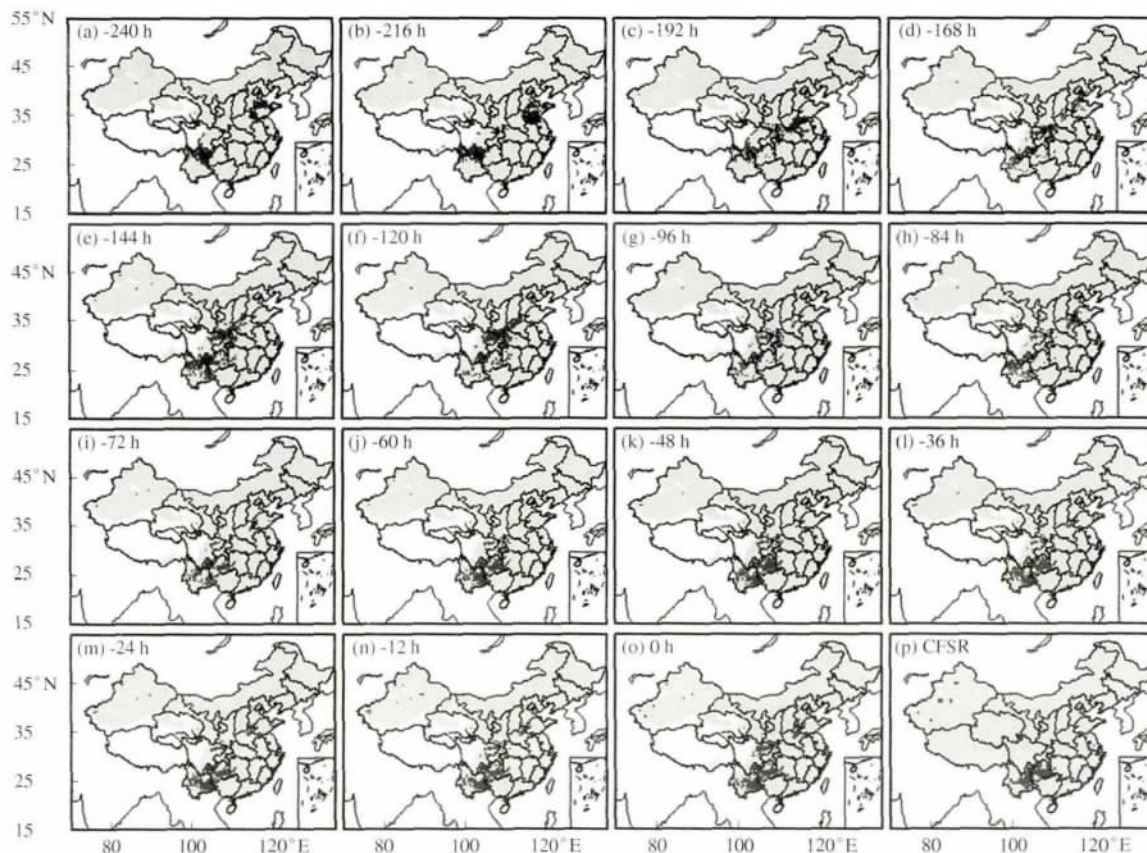


图9 2013年12月16日08时FRGPI场提前240 h至12 h预报(a—n)和再分析资料算得的FRGPI场(o—p)

FRGPI指数可以更简洁直观地指示适宜冻雨产生的地面温湿度及高空温度层结条件。该指数所需要要素简单且计算简便,因此更可与区域模式产品结合,在模式预报各要素可信的前提下,更高精度地对冻雨潜在落区及发生时间进行预报,对防灾减灾有一定的实用性。

4 结论

为更直观地找出可能发生冻雨灾害的区域,为预报员进一步识别降水相态打基础,我们用简单且常规的气象要素,根据冻雨发生时特定的地面气温、地面露点温度差及高空温度特征,构造了中国冻雨潜在生成指数,并作了初步检验。该指数不仅可以直观地表征以冻雨为主的雨雪冰冻灾害的潜在发生可能,用于模式产品后处理;同时可以结合再分析资

料,更高精度地分别对冻雨的三个基本特征进行分析研究,有很强的实用性。本文在定义了中国冻雨潜在发生指数的基础上,结合2013/2014年冬季冻雨发生的实际过程,从预报及形成冻雨的各基本条件方面对FRGPI的实用性作了进一步分析,结论如下:

2014年2月上旬,中国大范围的雨雪天气灾害在北部东移的高空槽与南部切变线、低空急流及暖湿气流的共同作用下产生,同时冻雨在此背景下发生。从FRGPI三个指标方面分别对此冻雨过程进行分析发现,受北部冷空气影响,适宜的地面气温条件集中在山东、安徽北部、湖北、湖南北部、陕西及甘肃等北方地区;适宜的温度露点差条件主要集中在江苏、湖南、湖北、贵州等南方地区;适宜的高空温度层结主要集中在中国中部中高纬与低纬天气系统交

界地带,三部分交叉区域则为冻雨高发地带。另外,此区域也为雨夹雪现象高发地带。冻雨区的确定,可能还应考虑地形、风速等要素,尚有待于进一步研究。

2014年2月中旬维持的西南涡与西南暖湿气流相结合,造成贵州及四川一带的冻雨现象。对FRGPI三个指标的分析与前者类似。贵州存在适宜的地面气温、温度露点差及高空温度层结,因此冻雨灾害严重;四川盆地由于海拔较低、气温较高,则主要为降水。

统计2013年11月至次年3月间不满足FRGPI各指标频数的概率分布发现:最易满足地面气温条件的区域为辽宁、河北、山西、陕西中部、甘肃南部、四川西部及新疆地区,其次是长江中下游地区,该区域与冬季寒潮过程中 0°C 所在区域一致;温度露点差条件最易满足区域为贵州、四川中东部、云南东部及长江中下游一带,主要由于受西南暖湿气流影响;高空温度层结最易满足区域为中国中南部及西南地区,该区域为中高纬与低纬天气系统交界地带,高空层结复杂。综合以上各指标,贵州及中国南方地区成为冻雨高发区域。比较各指标频数的空间分布及冻雨实测频数的空间分布发现,地面温度露点差可能是冻雨分布的主要制约因素。

结合欧洲中心的高精度数值预报产品,对2013年12月10日至2014年1月31日的冻雨发生情况进行了研究。结果发现,利用FRGPI指数能够提前10d有效地对冻雨灾害进行预报,且预报时效越短,准确率越高,提前7d预报的冻雨发生范围更为精确。利用模式算得FRGPI指数与降水预报相结合,可以更准确地预报冻雨发生范围,用于冻雨灾害的监测和预警,有一定的实用性。

参考文献

- [1]《大气科学辞典》编委会. 大气科学辞典[M]. 北京:气象出版社, 1994: 980.
- [2]赵思雄,孙建华. 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, 2008, 13(4): 351-367.
- [3]许丹,罗喜平. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 401-404.
- [4]叶茵,杜小玲,严小冬,等. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析[J]. 贵州气象, 2007, 31(6): 11-13.
- [5]严小冬,吴战平,古书鸿,等. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. 高原气象, 2009, 28(3): 694-701.
- [6]张艳梅,顾欣,陈海涛,等. 贵州高原西北部冻雨的时空变化特征[J]. 资源科学, 2011, 33(3): 477-482.
- [7]廖玉芳,张剑明,李英. 湖南省近60年雨凇的气候特征[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(5): 594-606.
- [8]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.
- [9]赵琳娜,马清云,杨贵名. 2008年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 556-566.
- [10]陶诗言,卫捷. 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, 2008, 13(4): 337-350.
- [11]李崇银,杨辉,顾薇. 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, 2008, 13(2): 113-122.
- [12]杨辉,李崇银. 冬季北极涛动的影响分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 395-404.
- [13]孙建华,赵思雄. 2008年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 368-384.
- [14]孙建华,赵思雄. 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, 2008, 13(4): 510-519.
- [15]曾明剑,陆维松,梁信忠,等. 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, 2008, 66(6): 1043-1052.
- [16]宗海锋,张庆云,布和朝鲁,等. 黑潮和北大西洋海温异常在2008年1月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2008, 13(4): 491-499.
- [17]王记芳,顾万龙,潘攀,等. 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, 2009, 32(1): 51-54.
- [18]吴蓁,赵培娟,苏爱芳,等. 2008年河南持续低温、冻雨和暴雪成因[J]. 气象与环境科学, 2009, 32(1): 9-15.
- [19]姚蓉,黎祖贤,许霖,等. 湖南冻雨预报关键技术指标及应用[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 366-372.
- [20]漆梁波,张瑛. 中国东部地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. 气象, 2012, 38(1): 96-102.
- [21]高守亭,张昕,王瑾,等. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 645-655.
- [22]王遵娅,赵珊珊,张强. 我国冰冻日出现的气象条件分析及其判别模型[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 158-163.
- [23]杨寅,何立富. 2014年2月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2014, 40(5): 642-648.
- [24]刘一. 2013年12月至2014年2月T639、ECMWF及日本模式中中期预报性能检验[J]. 气象, 2014, 40(5): 637-641.
- [25]潘留杰,张宏芳,朱伟军,等. ECMWF模式对东北半球气象要素场预报能力的检验[J]. 气候与环境研究, 2013, 18(1): 111-123.
- [26]朱彦良,凌超,陈洪滨,等. 两种再分析资料与RS92探空资料的比较分析[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(3): 381-391.

Application of China Freezing Rain Genesis Potential Index in Numerical Product

Niu Lu^{1 2}, Wang Guofu³, Huang Fei^{1 2 4}

(1. Physical Oceanography Laboratory of Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Qingdao 266100, China;

3. National Climate Center, Beijing 100081, China;

4. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Ocean and Atmosphere in Hazard System of Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on the specific three basic characteristics of surface temperature, surface humidity and upper air temperature when freezing rain occurs, freezing rain genesis potential index (FRGPI) of China was defined and verified preliminarily. And using ERA-Interim reanalysis and model forecast products, and combining with the cases of freezing rain in winters of 2013/2014, this article gave a further development and application of freezing rain genesis potential index. Results were as the followings, due to the interaction of the upper trough, mid-low-level shear-line, low-level jet and warm and wet flow, the southern China maintained suitable surface temperature t , depression of dew point temperature D , and upper air temperature stratification Er , the large-scale freezing rain disaster occurred in early February 2014. Under the influence of southwest vortex and warm and wet flow, Guizhou province also had suitable t , D and Er and then suffered continuous freezing rain disaster in mid-February. During the winter of 2013/2014, the suitable t which was favorable to freezing rain was located in the area where surface temperature was close to the freezing point in winter cold wave. The suitable D was mainly in the area where warm and wet flow occurred. The suitable Er mainly located in the strongly interaction area between middle-high latitude and low latitude. The overlapping area had highly occurrence frequency of freezing rain, and the surface depression of dew point temperature maybe the key factor influenced its spatial distribution. The freezing rain can be forecasted 10 days before by using FRGPI and Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) forecast products of the European Centre, which was benefit for freezing rain disaster prevention and mitigation.

Key words: freezing rain; freezing rain genesis potential index; ECMWF model; forecast