

一个中国冻雨潜在发生指数的建立*

牛璐¹, 黄菲^{1,3**}, 王国复²

(1. 中国海洋大学物理海洋实验室 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; 2. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 3. 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: 利用中国高空和地面观测资料,分析了贵州等地冻雨发生时的气象要素变化特征。结果表明:冻雨发生时地面温度较低,处于 $-7.3\sim 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;湿度较高,温度露点差 $0\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;风速 $1\sim 2\text{ m/s}$;降水量不太大;且高空存在逆温层,在对流层中下层随高度升高,温度在某一特定值上下波动,达到某一高度后,温度随高度递减。根据冻雨发生的气象要素变化特征,定义了一个新的中国冻雨潜在发生指数,用以表征冻雨发生的潜在可能性,并对2005—2014年中国冻雨的发生进行效果检验。结果表明,效果检验对各台站冻雨情况模拟准确率在90%以上,对几次冻雨过程均能很好地表征出来。进一步的研究表明,将该指数与降水结合,模拟准确率显著提高。

关键词: 冻雨;冻雨潜在发生指数;气象条件

中图分类号:P426.63

文献标志码:A

文章编号:1672-5174(2015)12-008-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20150042

2008年1—2月,中国南方遭受了大范围的持续性雨雪冰冻灾害,其中尤以冻雨灾害更为严重。自此越来越多的学者开始关注冻雨天气。冻雨(Freezing Rain)是指由过冷水滴组成的,与温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的物体碰撞立即冻结的降水。冻雨常压断树木、危害农作物;压断电线和电线杆,造成通讯和电力中断;妨碍公路铁路交通、威胁飞机的飞行安全等。国外对冻雨的研究起步较早,在20世纪初即有学者对冻雨进行了研究^[1],Stewart和King^[2]针对南安大略地区发生的3次冬季降水事件,分析了其中尺度风暴结构和各降水类型的演变过程,指出降水类型与粒子的大小、密度、高空逆温层温度等要素密切相关。Rauber等^[3]、Martner等^[4]、Szeto等^[5]针对几次比较严重的冻雨事件,从天气和中尺度结构方面,结合遥感、模式模拟等技术进行了比较细致的研究,发现冻雨通常发生在与冷暖锋相联系的冬季降水过渡带中。Huffman和Norman^[6]将冻雨的发生机制归纳为两种:一种是冰相机制,即冰晶在下落过程中会经过暖层融化为液态,然后经过再结冰层变为过冷水降落到地面;另一种是暖雨机制,即整个下落过程没有经过暖层,整层小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,雨滴以过冷水状态降落到地面。Rauber等^[7]在此基础上将冻雨结构又分成了6类。在对冻雨特征进行分析研究的基础上,国外学者开展了冻雨预报方法的研究。Prater和Borho^[8]将冻雨发生区域高空通常有零度层和风切变

的特点与冻雨灾害的监测算法相结合,提出雪花从高空降落通过暖层与冷层,若在暖层完全融化则落到近地面为冻雨,若没有完全融化则为冰粒。Czys等^[9]将粒子在暖层中停留的时间与粒子完全融化所用的时间的比值,作为产生冻雨与否的无量纲判据。若该判据大于等于1则为冻雨,否则为冰粒。Bourgouin^[10]根据不同降水类型对应的 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区域差异提出了一种新的预测方法,并与其它方法进行了对比。

美国及加拿大等地冻雨多与暖锋及输送带有关,中国冻雨发生情况与之并不完全相同^[11]。贵州及其附近区域因其特殊的地理位置、地形地貌和气候条件,是中国冻雨的高发地带^[12]。因此,对贵州冻雨的时空分布特征及临近的环流情况有较多的统计研究^[13-16],结果发现:低气温、较小的风速和高湿条件有利于冻雨的生成,且大多研究都强调冻雨发生时高空逆温层的存在。王遵娅等^[17]结合雨淞和雾淞的产生条件,利用日平均气温和天气现象构建了冰冻日判别模型。美国和加拿大的气象部门利用 $700\sim 850\text{ hPa}$ 间的位势厚度及 $850\sim 1\ 000\text{ hPa}$ 的位势厚度对雨、雪、冻雨等天气现象进行基本判别,但由于中国东西部海拔差距大,此方法并不适用于海拔较高地区。漆梁波^[18-19]对冻雨及冰粒的区分进行了分析,制定了一组中国东部地区冬季降水相态的推荐识别判据,该判据利用 $700\sim 1\ 000\text{ hPa}$ 内各标准层的温度或厚度值,针对不同降水类型划定

* 基金项目: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);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406017)资助

收稿日期:2015-02-06;修订日期:2015-03-30

作者简介:牛璐(1990-),女,硕士,主要从事气候变化方面的研究。

** 通讯作者: E-mail: huangf@ouc.edu.cn

取值范围,以期对中国东部地区冬季降水类型的甄别提供较好的参考。该方法对冻雨(冰粒)降雪的判别效果不理想,且仅对海拔低于 400 m 的区域适用。高守亭等^[20]针对贵州冻雨,提出先利用动力因子找出斜压性较强利于弱降水的区域,再结合单站探空资料进行三步判断的“动力因子”和“三步判别法”相结合的方法,需要预报员首先分析高空地面天气图确定锋区位置,进而利用单站探空资料进行预报。

冻雨等冰冻灾害往往是在高、中、低层各纬度天气系统的共同作用下产生的,因此伴有复杂的高空温湿层结;且细微的温湿度配置就可能造成不同的水的相态变化,进而影响最终的降水形态,如冰粒、雨夹雪等。然而不管是冻雨、冰粒,还是雨夹雪,均可能造成严重的冰冻灾害,对人们日常的生产生活产生不利影响。基于此,本文旨在用尽可能简单且常规的气象要素,构造一个直观的指数来表征以冻雨为主的雨雪冰冻灾害的潜在发生可能性,以期用于模式产品的后处理,得到中国境内可能发生冻雨等雨雪冰冻灾害的区域,进而为预报员进行具体的降水相态识别及防灾减灾打下基础。

因此,本文通过研究中国冻雨产生时对应的高空及地面气象条件,定义了一个新的冻雨潜在发生指数,作为以冻雨灾害为主的雨雪冰冻天气发生与否的判据,并对该指数的实用性作了初步检验,研究结果对此类灾害的实时监测和预测有一定意义。

1 资料分析

考虑到冻雨出现的区域和成灾影响,本文使用全球通信系统(Global Telecommunication System,简称 GTS)中参与国际交换的中国站地面及高空定时观测数据,时间长度为 2005 年 7 月 1 日—2013 年 6 月 30 日。由于高空资料观测时间为北京时 08 时和 20 时,为使高空和地面资料尽可能地时空匹配,地面资料也选取相应台站及时次。同时,为了保证数据的连续性,剔除了缺测次数过多的台站,最终选取中国 88 站的高空和地面匹配的定时观测资料,高空资料包括标准层和特性层各层数据。对原始观测资料,统计 08 时和 20 时冻雨实况,分析对应时刻地面温度、露点温度、风速等要素及高空温度。

在对地面观测资料中的冻雨发生情况进行分析时,出现则记为 1 次。88 个站中共有 13 个站有冻雨记录(共 501 次)。台站信息与冻雨次数如表 1 所示。由表 1 可知,贵州威宁站冻雨次数远高于其它台站,且海拔最高(2 236 m),其次是贵州贵阳站及湖南郴州站,江西、广西、安徽、河南、湖北、辽宁等地也观测到了冻雨现象。这个空间分布情况与前人研究得到的全国冻雨空间分布情况基本一致。经统计,1 月发生冻雨次数最多(279 次),占总数的 55.69%;其次是 2 月(89 次)和 12 月(87 次),分别占 17.76%和 17.37%;然后是 3 月(28 次)和 11 月(17 次),4 月仅有 1 次记录,其它月份没有观测记录。

表 1 2005 年 7 月 1 日—2013 年 6 月 30 日冻雨台站信息

Table 1 Information of stations with Freezing Rain from 1 Jul 2005 to 30 Jun 2013

站号 Station number	站名 Station	省份 Province	经度 Longitude/°E	纬度 Latitude/°N	海拔 Elevation/m	冻雨次数 Occurrence number
56342	沈阳	辽宁	123.43	41.77	43	1
54662	大连	辽宁	121.63	38.90	97	1
56691	威宁	贵州	104.28	26.87	22.36	358
57083	郑州	海南	113.65	34.72	111	2
57178	南阳	河南	112.58	33.03	131	3
57494	武汉	湖北	114.13	30.62	23	2
57749	怀化	湖南	110.00	27.56	261	1
57816	贵阳	贵州	106.72	26.58	1074	99
57957	桂林	广西	110.30	25.33	166	7
57972	郴州	湖南	113.03	25.80	185	14
57993	赣州	江西	114.95	25.85	125	3
58424	安庆	安徽	117.05	30.53	20	2
58606	南昌	江西	115.92	28.60	50	8

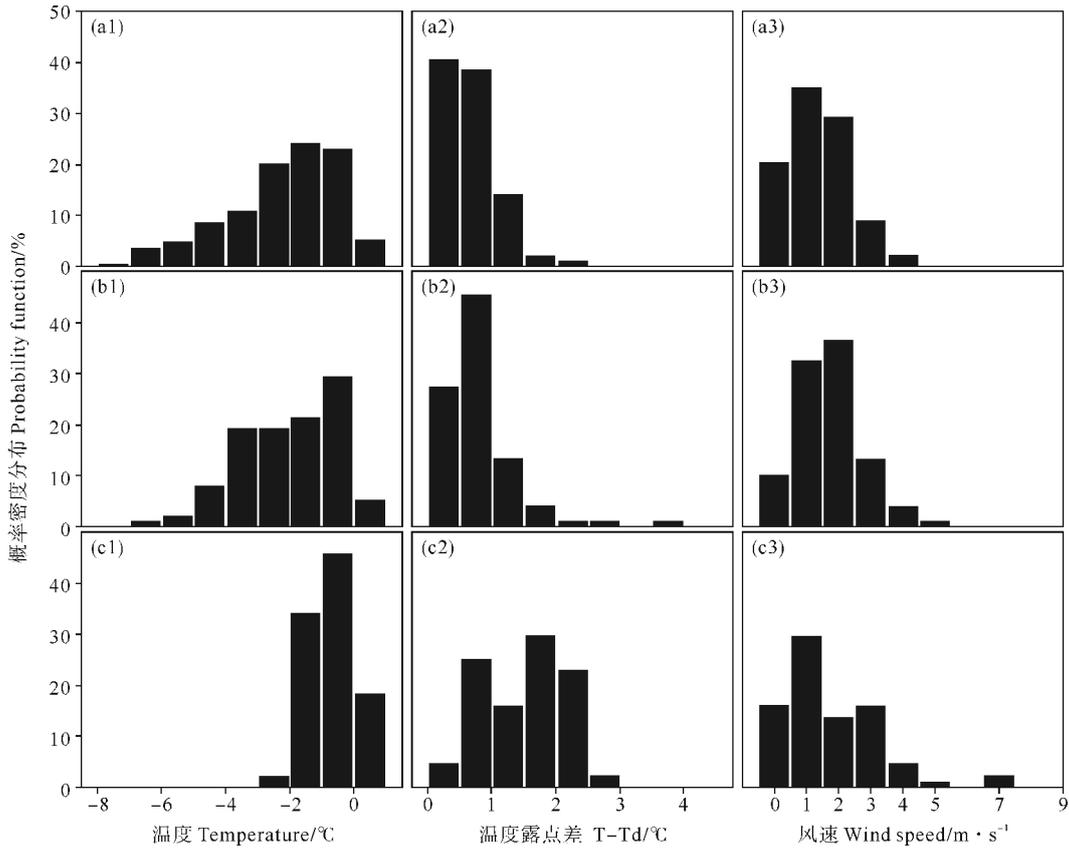
2 冻雨发生的气象条件

2.1 地面气象条件

本文分别对贵州威宁站、贵州贵阳站及其它海拔较低台站的温度、露点温度、温度露点差、风速、风向及降水量等地面要素进行统计。结果发现,威宁站冻雨发生时地面温度集中在 $-7.3\sim 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,露点温度为 $-7.9\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度露点差为 $0\sim 2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;风速最大值为 5 m/s ,风向以南北风为主;冻雨发生时降水量都不太大,通常为毛毛雨或小雨。贵州贵阳站情况与威宁站类似。而其它海拔较低台站,地面温度变化范围相对较小,在 $-2.7\sim 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温度相对略高,露点温

度为 $-4.1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度露点差集中在 $0.3\sim 2.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,6 h降水量最大值可达 17 mm ,平均6 h降水量为 1.83 mm ,雨量相对较大。

图1为贵州威宁站、贵州贵阳站及剩余台站地面温度、温度露点差及风速的频率百分比分布。由图可知,不同台站之间由于海拔、经纬度等差异,各要素的频率百分比分布也不尽相同,但各要素的值均相对集中。总体来说,冻雨发生时地面温度处于 $-7.3\sim 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$;近地面湿度较高,温度露点差以 $0\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜;风速较小, $1\sim 2\text{ m/s}$ 最适宜冻雨发生;风向以偏北风居多,且降水量往往不大,平均6 h降水量在 1 mm 左右。



(a)为贵州威宁站;(b)为贵州贵阳站;(c)为剩余海拔小于1 000 m台站。(a) Weining, Guizhou; (b) Guiyang, Guizhou; (c) The other station (<1 000 m.)

图1 出现冻雨时地面温度(1)、温度露点差(2)和风速值(3)的相对频率分布

Fig. 1 Distribution of relative frequency of surface temperature (1), surface depression of the dew point (2) and wind speed (3) when Freezing Rain occurs

2.2 高空温度特征

温度的垂直分布是冬季不同类型降水产生的主要原因,冻雨发生时,高空温湿特征明显。本文对冻雨发生时高空温度分布情况进行了初步研究。

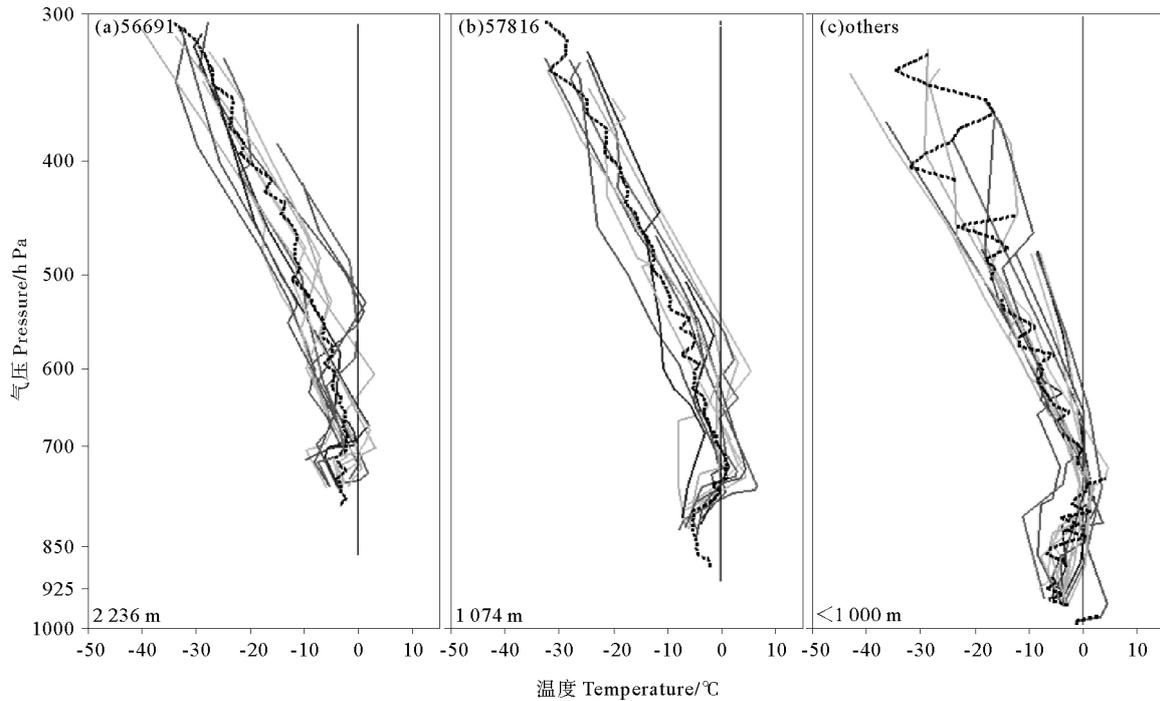
图2为对流层中下层大气温度随高度的垂直变化。由图可知温度廓线变化复杂,威宁站在 $500\sim 700\text{ hPa}$,贵阳站在 $550\sim 850\text{ hPa}$,其它站在 $700\sim 925\text{ hPa}$ 范围内均存在逆温现象。292例样本中仅有46

例(15.75%)没有逆温记录。剩余样本中,32.53%不存在暖层,51.71%存在暖层。海拔较高的威宁站有暖层的样本仅占37%。整体来看,冻雨发生时在对流层中下层某一高度以下,随高度升高,温度在某一特定值上下波动,达到这一高度后,温度随高度递减。

总体来说,冻雨发生时对流层中下层某一高度下均存在着复杂的温度波动。贵州地区冻雨多暖雨机制,其它地区多冰相机制;海拔可能是产生不同机制冻

雨的重要因素。由于冻雨的产生涉及到水分子在下落过程中复杂的相态变化, 这些云物理过程与大气湿度的垂直变化也密切相关, 有待于利用其它判据进行进

一步甄别, 本文只探究易于产生冻雨等雨雪冰冻天气的基本高空温度背景场。



((a) 贵州威宁站, (b) 贵州贵阳站, (c) 其它台站; 彩色实线为多个冻雨个例温度廓线分布, 黑色短虚线为各冻雨个例的平均温度廓线分布。(a) Weining, Guizhou (b) Guiyang, Guizhou (c) The other stations (<1000 m); The colorful solid line means the temperature variations of Freezing Rain cases, the black dotted line means the average temperature variation of all the Freezing Rain cases.)

图 2 冻雨发生时的温度廓线分布

Fig. 2 Temperature profile when Freezing Rain occurs

3 冻雨潜在发生指数

通过前文的分析比较, 发现冻雨发生时有几个典型特征。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 3 个基本特征。结合此基本特征, 本文定义了中国冻雨潜在生成指数 (Freezing Rain Genesis Potential Index, 简称 FRGPI), 作为冻雨的判别模型, 用来表征冻雨等雨雪冰冻天气潜在发生情况。

通过对比不同海拔台站冻雨发生时的高空温度廓线发现 (见图 2), 对流层中上层温度分布基本相同, 400 hPa 以下由于各站海拔不同, 逆温层高度也略有不同。

为消除海拔的影响, 引入 σ 坐标, 规定 $\sigma = \frac{p - p_0}{p_s - p_0}$ 。其中: p 为气压; p_s 为地面气压; $p_0 = 400$ hPa。

由图 2 知, 温度随高度升高或气压减小近似呈先升高后降低的变化规律。函数进行拟合发现, 温度 T (单位 $^{\circ}\text{C}$) 与 σ 值的 3 次拟合效果较好, 得到的拟合曲线为:

$$T = b_0 + b_1\sigma + b_2\sigma^2 + b_3\sigma^3. \quad (1)$$

其中: b 为拟合系数; $b_0 = -19.41$; $b_1 = 43.92$; $b_2 = -24.52$; $b_3 = -4.75$ (见图 3)。该曲线类似冻雨发生时的平均层结曲线, 求得此曲线拐点的 σ 值为 0.738,

若 $p_s = 1000$ hPa, 此时 $p = 842.8$ hPa; 若 $p_s = 750$ hPa, 则 $p = 658.3$ hPa。因此说明发生冻雨时, 高空有逆温, 温度最大值约在 650~850 hPa 对应的高度。

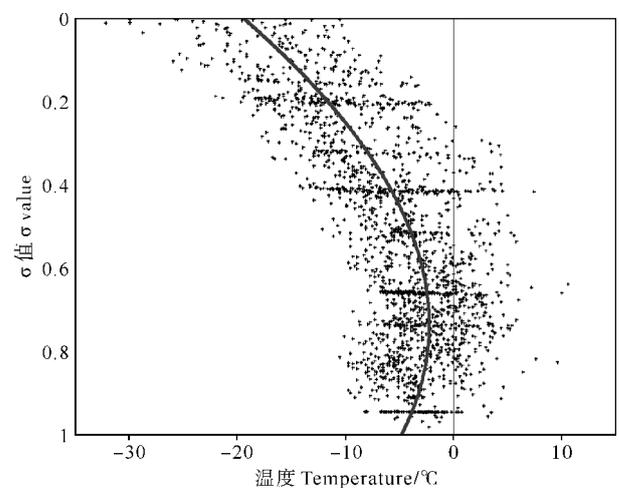


图 3 冻雨发生时对应的高空温度与 σ 的散点分布及三次拟合曲线

Fig. 3 Scatter distribution between temperature and σ , and the related cubic fitting curve for Freezing Rain

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:

$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \hat{T}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

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。这样便可以利用气压标准层的温度值初步推断高空温度是否满足冻雨产生条件,若 Er 在一定阈值内,则认为满足冻雨发生的基本高空温度条件。

统计发现,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,中位数为 3.69°C 。因此,规定若 $0.8 \leq Er \leq 8.5$,则认为符合冻雨的高空温度基本特征,否则不符合。

同时,规定

$$Er' = \begin{cases} \frac{Er - Er_z}{Er_{\max} - Er_z}, & (Er > Er_z) \\ \frac{Er_z - Er}{Er_z - Er_{\min}}, & (Er < Er_z) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $Er_z = 3.69^\circ\text{C}$, 为中位数; Er_{\max} 和 Er_{\min} 为临界值, $Er_{\max} = 8.5^\circ\text{C}$; $Er_{\min} = 0.8^\circ\text{C}$ 。 $Er' \leq 1$ 等价于 Er 值在 $0.8 \sim 8.5^\circ\text{C}$ 的范围内,若 $Er' > 1$ 则不在此阈值内,且取值越大,偏差越大。

图4为1月有冻雨和无冻雨时地面温度与露点温度差的散点图分布,明显可以看出,有冻雨时地面温度与露点温度差范围集中。

类似 Er , 统计发现,95%以上的 T 值都在 $-7.1 \sim 0.9^\circ\text{C}$ 的范围内; D 为温度露点差, $D = T - T_d$, 95%以上的 D 值在 $0 \sim 2.5^\circ\text{C}$ 范围内。因此规定,若 $-7.1 \leq T \leq 0.9$, 则认为满足冻雨发生的地面温度特征,否则不满足。若 $0 \leq D \leq 2.5$, 则认为满足地面温度露点差特征,否则不满足。

同 Er' 的定义,规定:

$$T' = \begin{cases} \frac{T - T_z}{T_{\max} - T_z}, & (T > T_z) \\ \frac{T_z - T}{T_z - T_{\min}}, & (T < T_z) \end{cases} \quad (4)$$

$$D' = \begin{cases} \frac{D - D_z}{D_{\max} - D_z}, & (D > D_z) \\ \frac{D_z - D}{D_z - D_{\min}}, & (D < D_z) \end{cases} \quad (5)$$

其中: $T_z = -1.7$; $T_{\max} = 0.9$; $T_{\min} = -7$; $D_z = 0.7$, $D_{\max} = 2.5$, $D_{\min} = 0$ (单位 $^\circ\text{C}$)。

因此,定义中国冻雨潜在发生指数:

$$FRGPI = \max\{T', D', Er'\} \quad (6)$$

若该值小于等于1,则认为是符合冻雨发生的3个显著特征,若该值大于1,则认为不全符合该特征。该式表明,若3个条件均在一定阈值内,则冻雨发生的可能性就较大。

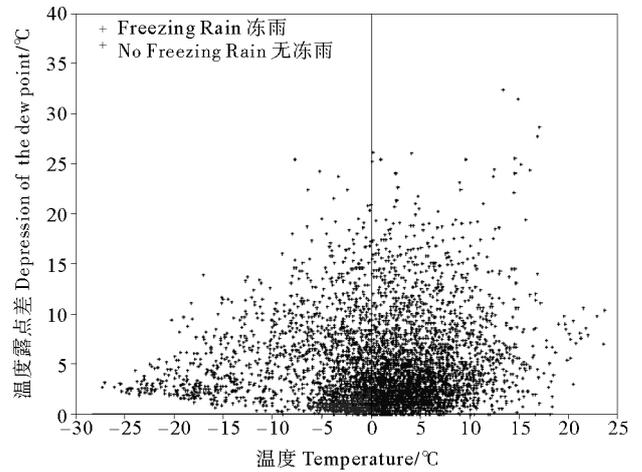


图4 13站1月冻雨发生(红色)与没发生(蓝色)时温度和温度露点差的散点分布

Fig. 4 Scatter distribution between temperature and depression of the dew point of 13 stations for Freezing Rain (red) and no Freezing Rain (blue) in January

4 冻雨潜在发生指数的检验

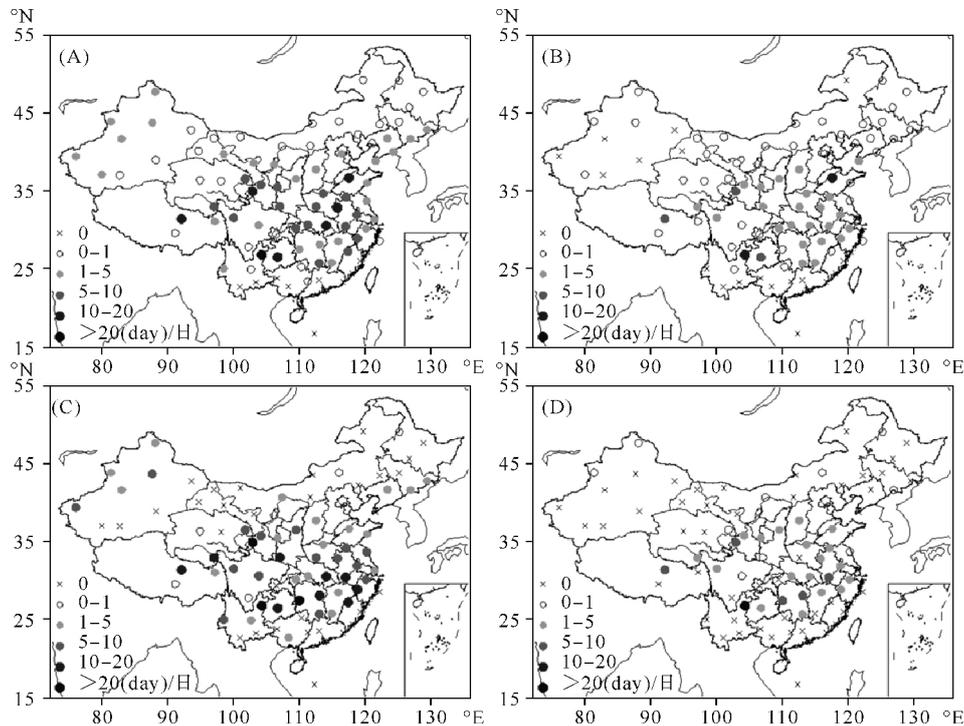
为检验 FRGPI 表征冻雨的准确度,本文回算了2005—2013年间各探空站 FRGPI 指数,并与实际情况进行对比。

全国来看,各测站的模拟正确率均在90%以上。对13个有冻雨观测记录的台站,在统计的8年期间,除贵州威宁站4次漏报,贵州贵阳2次漏报,广西桂林1次漏报外,其它台站均没有漏报。分析各漏报情况,发现威宁站有3例为 Er 值偏大,1例为 T 值偏小;贵阳2例为 D 值偏大;桂林1例为 D 值偏大。分析其原因,主要由于各指标所取阈值范围占总分布的95%(为降低空报率),导致个别冻雨个例对应条件不在所取阈值内,造成漏报。年平均空报日数的空间分布如图5(A)所示。黄河以北及云南、广西等地区空报日数较少,均在5d以内;黄河以南及长江流域地区年空报日数相对较多,有7个站空报日在10d以上,分布在贵州、陕西、安徽等地区。针对冻雨灾害较频繁的贵州及湖南地区,分析其代表台站发现,贵州威宁站 TS 评分为45.05%,漏报率为1.19%,空报率为54.71%;贵州贵阳站 TS 评分为30.97%,漏报率为2.04%,空报率为68.83%。湖南郴州站 TS 评分为14.43%,漏报率为0,空报率为85.57%。

文中 FRGPI 的定义只考虑了地面温度、湿度及高空温度,并没有分析水汽情况,而冻雨的发生伴随着降水的出现。因此,即使 FRGPI 的值小于等于1,若没有降水,也不会有冻雨产生。这也是各台站年空报日数较多的可能原因之一。采用 FRGPI 与降水相结合的方式,在 FRGPI 小于等于1的条件下,若降水量大于

0,则认为发生冻雨,否则没有发生。采用此种方法后统计发现,各测站空报次数显著减少,模拟准确程度显著提高,模拟正确率均在 95% 以上。漏报情况仍为贵州威宁站 4 次,贵州贵阳 2 次,广西桂林 1 次,年平均空报日数如图 5(B)所示。大部分台站年空报日数都在 5 d

以内,仅两个测站在 10 d 以上。对于冻雨频发区域,贵州威宁站 TS 评分为 63.95%,漏报率为 1.2%,空报率降为 35.55%。贵州贵阳站 TS 评分为 38.68%,漏报率为 2.08%,空报率为 61%。湖南郴州站准确程度也有一定提高。



(AC 为 FRGPI 判别, BD 为 FRGPI 与降水量结合判别, AB 为 2005 年 7 月—2013 年 6 月, CD 为 2013 年 7 月—2014 年 6 月, 单位: 天。Based on FRGPI (A/C) or FRGPI and precipitation (B/D). A/B: Jul 2005—Jun 2013, C/D: Jul 2013—Jun 2014. Unit: d.)

图 5 冻雨年空报日数的空间分布

Fig. 5 The pattern of simulated false days of Freezing Rain

对所有空报日对应的天气现象进行统计,若只利用 FRGPI 进行判别,空报时有 1 699 次无现象,占 34.87%;1 715 次为雾,占 35.20%;225 次为雨,占 4.62%;856 次为雪,占 17.57%;354 次为雨夹雪或冰粒等其它降水现象,占 7.27%;23 次为雾凇,占 0.47%。若结合 FRGPI 与降水量进行判别,则有 225 次为雨,占 11.29%;855 次为雪,占 42.9%;353 次为雨夹雪或冰粒等其它降水现象,占 17.71%;另仍有 199 次无现象和 361 次雾,占 28.10%。

利用 2013 年 7 月—2014 年 6 月 88 探空站实测地面及高空数据(每站 730 次),本文对 FRGPI 指数的预报能力作了进一步检验。

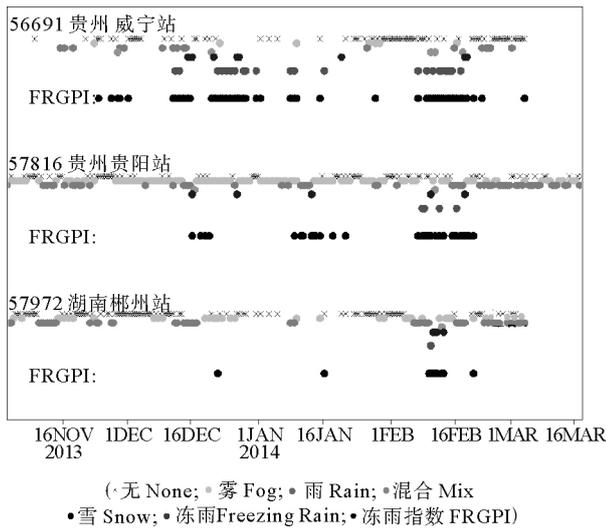
统计发现,2013 年 12 月—2014 年 2 月有 3 个站共 28 次冻雨记录,其中威宁站 23 次,贵阳站 4 次,郴州站 1 次。利用地面温度、露点温度及高空各层温度计算得到 FRGPI 指数。比较发现,对威宁站,除 2014 年 1 月 16 日 08 时有 1 次漏报,其余 22 次均预报正确,空报 32 次;贵阳站 4 次冻雨均没有漏报,空报 27 次;郴州站没

有漏报,空报 9 次。

图 6 为此时段 3 站的 FRGPI 数及实测天气现象随时间的变化。对威宁站,FRGPI 指数对几次冻雨过程都能准确预报。通过统计空报时对应的天气现象发现,空报时有 15 次无降水;17 次为其它降水类型,且对应时段都伴随着复杂的降水类型变化。如 2013 年 11 月 28—29 日的降水过程,实际天气现象为雨夹雪转雨;2013 年 12 月—2014 年 2 月间空报对应的几次其它类型的降水过程,均与冻雨过程相伴随。FRGPI 指数能较好地表征冻雨等雨雪冰冻天气的潜在发生可能,但由于冻雨、冰粒、雨夹雪等产生过程复杂,伴有复杂的水分子的相态变化,因此对于这些降水类型的进一步甄别,需要利用更多气象要素作为判据进行分析。

图 5(C)为 FRGPI 指数算得的 2013 年 7 月—2014 年 6 月的年空报日数的空间分布。图 5(D)为与降水结合后的年空报日数的空间分布。比较发现,该空间分布与回算所得的年冻雨日数空间分布一致。整体来看,年空报日数可以控制在一定范围,FRGPI 指数可以

有效地预报冻雨等这类雨雪冰冻灾害的潜在发生。



(黑色为 FRGPI, 红色为冻雨, 绿色为降雨, 黄色为雾, 深蓝色为降雪, 浅蓝色为雨夹雪, 叉号为无现象。Black: FRGPI; Red: Freezing Rain; Green: Rain; Light blue: mixed; Blue: Snow; Cross: none.)

图6 2013/2014年冬季FRGPI预报与对应天气现象

Fig. 6 The FRGPI Forecast and the weather phenomenon during the winter of 2013/2014

综上所述,FRGPI指数能够很好地表征以冻雨为主的雨雪冰冻天气的潜在发生可能性,对此类过程能进行有效地预报,漏报很少。将该指数与降水预报相结合,可以大大提高预报的准确程度。另外,冻雨的产生涉及到水分子在下落过程中复杂的相态变化,冻雨的产生不仅与逆温层有关,而且与冰晶(或雪花)的大小及融化再结冰程度,或雨滴的状态有密切联系。细微的变化便会导致降水形态的不同。因此,对于冰粒、雨夹雪等降水类型更细致的区分需要加入更多判据进行更严格的预报。然而对于识别以冻雨为主的冰冻天气的产生背景,FRGPI已足够方便快捷地进行基本判定。

5 结论

以冻雨为主的雨雪冰冻灾害往往在高、中、低层各纬度天气系统的共同作用下产生,其对应的高空温度廓线变化复杂,且地面温度较低,利于冰冻形成,同时在降水的作用下近地面空气接近饱和。基于此3个基本特征,本文利用冻雨资料,定义了中国冻雨潜在发生指数(FRGPI),初步对此指数进行了检验。结论如下:(1)中国冻雨主要集中在贵州省,江西、广西、安徽、河南、湖北、辽宁等地也有零星分布。观测到冻雨最多的台站为贵州威宁站,发生次数远高于其它台站。冻雨发生月份主要为11月至次年3月,其中1月最多,其次是2和12月。

(2)冻雨发生时地面温度较低,处于-7.3~0.9℃;近地面湿度较高,温度露点差为0~3.9℃;风速较小,大部分为1~2 m/s;风向以偏北风居多;降水量往往不太大。高空大多存在逆温层,但是有的存在暖层,有的没有暖层。分析发现,冻雨发生时在对流层中下层某一高度以下,随高度升高,温度在某一特定值上下波动。达到这一高度后,温度随高度递减。

(3)根据冻雨发生时的地面温度、露点温度及高空温度垂直变化特征,本文定义了中国冻雨潜在发生指数(FRGPI),利用它作为以冻雨为主的雨雪冰冻天气的判别模型,表征冻雨的潜在发生可能。定义式如下: $CZRI = \max\{T', D', Er'\}$ 。若该值小于等于1,则认为满足冻雨发生条件;若大于1,则不满足。即认为,若地面温度、地面温度露点差及高空温度变化均在一定阈值内,则产生以冻雨为主的冰冻灾害的可能性较大,此时高空温度最大值约在650~850 hPa对应高度。

(4)利用FRGPI定义方法对88个探空站观测数据进行回算,发现各站针对冻雨的模拟正确率均在90%以上,漏报次数较少,空报次数较多。对所有空报日数对应的天气现象进行统计发现,最多的情况为无现象,其次还有雾,然后是雨、雪、雨夹雪等其它降水形式。

(5)对2013年7月—2014年6典型台站的冻雨进行预报检验,发现FRGPI指数能够很好地表征冻雨的潜在发生可能,对几次以冻雨为主的雨雪冰冻过程均能进行有效地预报,漏报很少。由于FRGPI的定义并没有分析水汽情况,但是冻雨的发生伴随着降水现象,因此将该指数与降水预报相结合,空报次数显著减少,准确程度显著提高。冻雨的产生涉及到水分子在下落过程中复杂的相态变化,细微的变化便会导致降水形态的不同。因此,FRGPI指数不能很好地区分温度层结类似的雨夹雪等天气现象,对于这些降水类型的区分可以进一步加入更多判据进行分析。

致谢:感谢高山红教授对全球GTS观测数据的获取与保存。

参考文献:

[1] Root C J. Ice storm in illinois [J]. Mon Wea Rev, 1912, 40: 373-384.

[2] Stewart R E, King P. Freezing Precipitation in Winter Storms [J]. Mon Wea Rev, 1987, 115: 1270-1280.

[3] Rauber R M, Ramamurthy M K, Tokay A. Synoptic and mesoscale structure of a severe Freezing Rain event: The St. Valentine's Day ice storm [J]. Wea Forecasting, 1994, 9: 183-208.

[4] Martner B E, Snider J B, Zamora R J, et al. A remote sensing view of a Freezing Rain storm [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2562-2577.

[5] Szeto K K, Tremblay A, Guan H, et al. The mesoscale dynamics

- of Freezing Rain storms over Eastern Canada [J]. *Atmos Sci*, 1999, 56: 1261-1281.
- [6] Huffman G J, Norman G A. The supercooled Warm Rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon Wea Rev*, 1988, 116: 2172-2182.
- [7] Rauber R M, Olthoff L S, Ramamurthy M K, et al. The relative importance of Warm Rain and melting processes in freezing precipitation events [J]. *Appl Meteor*, 2000, 39: 1185-1195.
- [8] Prater E T, Borho A A. Doppler Radar wind and reflectivity signatures with overrunning and Freezing-Rain episodes: Preliminary results [J]. *Appl Meteor*, 1992, 31: 1350-1358.
- [9] Czys R R, Scott R W, Tang K C, et al. A physically based, non-dimensional parameter for discriminating between locations of Freezing Rain and ice pellets [J]. *Wea Forecasting*, 1996, 11: 591-598.
- [10] Bourgouin P. A method to determine precipitation types [J]. *Wea Forecasting*, 2000, 15: 583-592.
- [11] 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.
- [12] 许炳南. 贵州冬季凝冻预测信号和预测模型研究 [J]. *贵州气象*, 2001, 25(4): 3-6.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 漆梁波. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点 [J]. *气象*, 2012, 38(7): 769-778.
- [20] 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.

Creation of a New Freezing Rain Genesis Potential Index over China

NIU Lu¹, HUANG Fei^{1,3}, WANG Guo-Fu²

(1. Physical Oceanography Laboratory and Key Laboratory of Ocean-Atmospheric Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: By using the upper-air and surface observations over China, we analyzes the features of meteorological elements during freezing rain events in China. The results show that when Chinese freezing rain occurs, the surface temperature is usually $-7.3\sim 0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; The surface dew point temperature is $0\sim 3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$; The wind speed is $1\sim 2\text{ m/s}$; Precipitation is usually little. Most of freezing rain is associated with temperature inversion layer in the upper-air. The temperature fluctuates in the lower troposphere and then decreases with elevation. Based on that, a freezing rain genesis potential index (FRGPI) is defined to indicate the possibility of freezing rain occurrence. The accuracy is tested by using the observation data (2005—2014). The result illustrates that the accuracy rate of each station is above 90% and the process of freezing rain events can be indicated well. The accuracy can be much higher if combine FRGPI with precipitation, which is benefit for freezing rain disaster prevention and mitigation.

Key words: Freezing Rain; Freezing Rain Genesis Potential Index(FRGPI); meteorological conditions

责任编辑 庞旻