

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.

2011~2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和 冻雾的特征分析

李杰^{1,3,4} 郭学良^{1,2} 周晓宁⁵ 李兴宇¹

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

² 中国气象科学研究院, 北京 100081

³ 中国科学院大学, 北京 100049

⁴ 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106

⁵ 南京航空航天大学金城学院, 南京 211156

摘 要 研究冰冻天气的特征对于更好的认识冰冻天气, 提高此类天气的预警预报能力, 从而达到防灾减灾有重要意义。利用 2011~2013 年间中国民航机场的一小时或半小时一次的例行观测和特殊观测资料, 分析了冻雨、冻毛毛雨和冻雾天气的时空分布、持续时间和气象条件等特征。研究结果表明: 我国大部分地区均会发生冰冻天气。冻雨和冻毛毛雨的频发区与其持续时间较长区比较一致, 而冻雾的少发区, 其持续时间也可能较长。我国冰冻天气最容易在冬季 (12~2 月) 发生, 在 1 月出现的比例最高; 在凌晨 [00~07 时 (当地时间, 下同)] 出现频率相对较高, 午后 (13~14 时) 出现频率最低。一次冰冻天气的持续时间一般不超过 2 个小时。温度在 $-3\sim-1^{\circ}\text{C}$, 露点温度在 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$, 温度露点差在 $0\sim1^{\circ}\text{C}$ 时冰冻天气发生的频率最大。出现冰冻天气时的风向以东北风和北风为主, 而平均风速在 $2\sim3.9\text{ m s}^{-1}$ 时冻雨和冻毛毛雨发生的频率最大。我国冻雨和冻毛毛雨发生时, 同时常会有雾或轻雾; 冻雾出现时, 一般不会伴随其他天气。

关键词 冰冻 时空分布 气象条件 中国

文章编号 1006-9895(2015)05-1038-11

中图分类号 P246

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14239

Characteristics of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Freezing Fog in China from 2011 to 2013

LI Jie^{1,3,4}, GUO Xueliang^{1,2}, ZHOU Xiaoning⁵, and LI Xingyu¹

¹ Laboratory of Cloud and Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

⁴ College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106

⁵ Jincheng College, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211156

Abstract Studying the characteristics of freezing weather in China ultimately helps people to understand freezing weather more comprehensively. It also contributes to warning and forecasting capabilities for freezing weather, and thus

收稿时间 2014-08-11; 网络预出版日期 2015-01-28

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41005072、40575003, 中央高校基本科研业务费专项资金资助 NJ20140015, 国家电网公司科技项目资助 GCB17201400162

作者简介 李杰, 男, 1979 年出生, 讲师, 博士研究生, 主要从事航空气象方面的研究。E-mail: jetly@126.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

disaster reduction. Using data from hourly or half hourly routine and special observations from civil aviation airports in China for the period 2011–2013, the characteristics of temporal and spatial distribution, duration and weather conditions of freezing weather events were analyzed. It was found that the freezing weather events during the study period occurred in most regions of China. The high-frequency region for freezing rain or freezing drizzle events corresponded well to that of high intensity. In the low-frequency region for freezing fog, events tended to last longer. Freezing weather usually occurred in the winter season (December to February), and mostly in January. Events occurred frequently in the early morning [from 0000 to 0700 local time (LT)] and infrequently in the afternoon (from 1300 to 1400 LST). The duration of each freezing precipitation event was usually less than 2 h. Most freezing weather events occurred when temperatures were -3°C to -1°C and dew point was -4°C to -1°C . The highest frequency of freezing weather events occurred when the dew point drop was 0°C to 1°C . The dominant winds were northeasterly or northerly when freezing precipitation occurred, and the wind speed was usually $2\text{--}3.9\text{ m s}^{-1}$. Most freezing rain and freezing drizzle was mixed with fog, whereas freezing fog was not mixed with other precipitation.

Key words Freezing weather, Temporal and spatial distribution, Meteorological conditions, China

1 引言

冻雨、冻毛毛雨和冻雾天气会严重影响电力、通讯、交通、农业和经济等活动,如 2008 年 1 月发生在我国南方的大范围、长时间的严重低温雨雪冰冻天气(陶诗言和卫捷, 2008; 李崇银等, 2008)。在冻雨、冻毛毛雨和冻雾的天气情况下,容易形成雨淞或雾淞(吴兑, 2008),会带来灾害性后果,如由于电线积冰引起电力事故或通讯线路的中断;铁轨和路面积冰,妨碍铁路和公路运输;或者因积冰冻伤、压死农作物,对农业及畜牧业造成极大危害。此外,在此类天气条件下飞行,可能会因飞机机身表面形成积冰,影响飞机性能而造成飞行事故。因此,冰冻天气作为一种重要气象灾害会对社会经济和人民生产生活造成巨大影响,对此类灾害性冰冻天气的变化特征及形成原因的深入研究,有助于提高对此类天气的预警预报能力,从而达到防灾减灾的目的。

冰冻现象主要由雨淞、雾淞、湿雪冻结而成的天气状况(Makkonen, 2000)。美国气象学者将冻雨(Freezing rain)、冻毛毛雨(Freezing drizzle)和冻雾(Freezing fog)统称为冻结降水(Glickman, 2000)。当地面观测到冰粒(Ice Pellets)时,高空会有冻雨(Hanesiak and Stewart, 1995)。当地面观测到冻雨、冻毛毛雨或冰粒时,在低层大气会产生比较严重的积冰(Bernstein and Brown, 1997; Bernstein, 2000)。因此,地面冻雨、冻毛毛雨和冻雾的观测可以用来部分代表过冷却水的积冰环境(Cortinas et al., 2004)。

关于冰冻天气的气候特征研究主要包括对其区域分布、时间分布、变化特征、持续时间、发生

频次、气象条件的分析。冻雨和冻毛毛雨在一年四季都有可能发生,如在加拿大北部 6、7 和 8 月(Stuart and Isaac, 1999; Houston and Changnon, 2007)均出现过冻雨和冻毛毛雨,但主要发生在 11 月至来年 3 月(Robbins and Cortinas, 1996; Changnon, 2003)。地理位置越北,冻雨和冻毛毛雨逐渐减少;同时,冻毛毛雨的出现频次高于冻雨。冻结降水的持续时间一般比较短(Cortinas et al., 2004),但具有中尺度的时空特征(Branick, 1997; Cortinas et al., 2004)。冻雨产生时地面温度会低于 0°C (Cortinas et al., 2004)。温度在 $-2.2\sim 0^{\circ}\text{C}$,露点温度在 $-2.8\sim 0.6^{\circ}\text{C}$,风速在 $4.0\sim 5.9\text{ m s}^{-1}$ 时冻雨发生频率最大(Houston and Changnon, 2007)。冻雨和冻毛毛雨出现时一般不会伴有其他类型降水(Cortinas et al., 2004)。

我国关于冰冻天气的气候特征研究也取得了一些重要成果。中国大部分地区的冰冻天气以雨淞和雾淞为主,在我国的云、贵、川、粤北等地区较为常见,尤其在严冬和初春季节(谭冠日等, 1985; 王守礼, 1993)。中国年平均雨淞日数南方多于北方,而雾淞日数北方多于南方;雨淞和雾淞都是潮湿地区较干旱地区多,山区比平原多(张家诚, 1991)。

冰冻天气的分布具有较强的区域性特征(王遵娅, 2011)。三峡地区是我国典型的雾淞区(蒋兴良等, 1998);湖南雨淞空间分布呈现为南多北少、东多西少、迎风坡多、背风坡少的特征(廖玉芳等, 2012)。贵州省冰冻日数从西向东、从中部向南北两侧递减(杨利群, 1999; 张宇发, 1999; 叶茵等, 2007);贵阳冻雨频次的空间分布均呈由东北向西南减少的趋势(黄世芹等, 2012);江苏西北部地

区的冰冻发生得多,而东南部出现得少(孙燕等,2013)。

我国冻雨一般从11月开始到来年3月结束,以1月居多(占72%)。冻雨多发生在长江以南区域,占总数的90%以上。出现冻雨时地面温度(百叶箱温度)均低于 0°C (欧建军等,2011)。日平均温度 0°C ,日最低气温 -2°C ,平均风速 1.5 m s^{-1} 是最适宜产生冰冻天气的条件(王遵娅等,2011)。我国大部分地区冰冻天气呈现出显著的年代际和年际变化特征(廖玉芳等,2012;宗志平等,2013),在全球变暖背景下,从上世纪90年代开始发生频次减少而强度增强(赵珊珊等,2010;王遵娅,2011;宗志平等,2013)。

从已有研究可以看出,我国全国范围的冰冻天气的分析是基于气象站的逐日气象观测资料(赵珊珊等,2010;王遵娅等,2011;王遵娅,2011;宗志平等,2013)或常规气象观测资料(欧建军等,2011)。同时,气象业务上将冰冻天气分为雨淞和雾淞两种情况。由于这些资料的时间分辨率及天气现象的记录不足,难以对冻雨、冻毛毛雨和冻雾的详细气候特征进行系统分析。我国自动气象站的扩建给精细化分析研究带来了可能性,但观测资料在时间和空间上的密度不足(杨萍等,2013),利用自动气象站小时资料对冰冻天气的气候特征进行研究还未能开展。

为进一步了解我国冰冻天气的气候特征,本文

基于全国202个民航机场的一小时或半小时一次的航空气象地面例行观测和出现冰冻天气时的特殊观测资料,分析了我国冻雨、冻毛毛雨和冻雾天气发生的区域分布、时间分布、持续时间和气象条件等特征,可为提高冰冻天气形成的认识和预报准确率提供参考。

2 资料与方法

本文所用资料是2011~2013年间中国202个机场约455万个时次例行观测(每小时或半小时一次)和出现重要天气现象变化时的特殊观测,各机场观测站点分布如图1所示。观测资料的获取依据中华人民共和国民用航空行业标准MH/T 4016-2007所规定的观测仪器和设施按照规范(中国民用航空局,2007)进行观测和报告(中国民用航空局空管行业管理办公室,2007)。由于在实际观测记录中会将冰粒与小冰雹进行误判(Cortinas et al., 2004),即地面观测记录的是冰粒,实际可能是小冰雹。因此,在分析冰冻天气时没有包含冰粒数据。在分析中,如果某机场某时次的例行观测或特殊观测有冻雨、冻毛毛雨或冻雾发生,则定义为一个冰冻天气观测记录。最终得到248个时次冻雨(其中19个时次特殊观测),303个时次冻毛毛雨(其中8个时次特殊观测)和14551个时次的冻雾(其中1451个时次特殊观测)观测记录。

在分析冰冻天气区域分布特征时,选用2011~

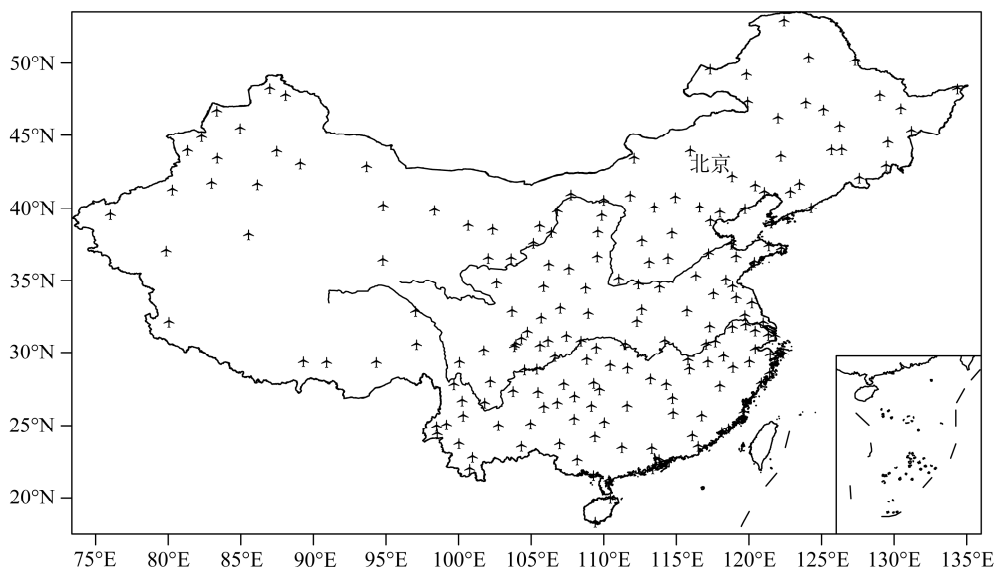


图1 机场观测站点分布

Fig. 1 The spatial distribution of weather observation stations at civil airports used in this study

2013 年间具有 3 年记录的机场（共 176 个机场）观测数据。为便于站点之间进行比较，统一选用整点的小时观测资料。

目前，在研究冻雨强度时常用发生次数（赵珊珊等，2010；宗志平等，2013）和事件持续时间（严小冬等，2009）。冰冻天气的次数和持续时间通过统计连续的小时观测资料来得到（Cortinas et al., 2004）。如有两次冻雨的观测报告，但观测间隔超过 1 小时，这样冻雨计为两次冻雨，每次冻雨的持续时间计为 1 小时，此时计算的持续时间为最大可能持续时间，误差不超过 1 小时。基于上述定义：如某机场分别在 08 时、09 时和 11 时观测到冻雨。那么统计时认为 08 时和 09 时是一个连续的冻雨过程，这个冻雨过程的持续时间为 2 小时；11 时是另外一个冻雨过程，这个冻雨过程的持续时间为 1 小时。该机场 08 时、09 时和 11 时计为 3 个时次的观测。但是这 3 个时次的冻雨观测是 2 次冻雨过程，第 1 次持续时间为 2 小时，第 2 次持续时间为 1 小时。Cortinas（2000）研究表明由于冻雨这类冰冻天气通常不会持续较长时间，在此期间不会有其他类型的降水，增加间隔时间不会显著改变其分布特征。最终得到 71 次冻雨，81 次冻毛毛雨和 2417 次冻雾。

如果在样本较少的情况下，数据呈非正态分布，为减少误差，避免个别极端事件的影响，使结果更有统计意义，采用中值和平均值等统计指标（Roberts and Stewart, 2008）。

在分析各气象要素特征时，剔除相关气象要素缺测的记录及数据不合理的记录（如露点温度低于 -50°C 、温度露点差为负值等），各样本数统计如表 1 所示。

在分析冰冻天气的时间分布时，将民航观测中使用的协调世界时（UTC）转换为所在时区的地方时（LT），并用 5 点 3 次中心平滑法对数据进行平滑处理。

3 结果与讨论

3.1 冰冻天气区域分布特征

如图 2a, c, e 所示，在我国大部分地区都发生过冰冻天气，冰冻天气的分布具有明显的区域性特征，集中分布在我国的中部、东北、西南和新疆等地区。

在我国华北、华中、华东、西南、新疆及东北

表 1 样本数统计表（其中冰冻天气次数与持续时间的样本数相同，月份与小时的样本数相同）

Table 1 Statistics of the freezing weather event samples. The number of freezing weather samples is equal to the frequency of their duration, and the number of months is equal to that of hours

	样本数		
	冻雨	冻毛毛雨	冻雾
冰冻天气次数、持续时间	71	81	2417
月份、小时	199	250	10099
温度	248	303	14501
露点温度	248	303	14498
露点温度差	248	303	14495
风速	248	305	14451
风向	226	277	11849
天气现象	248	305	14551

地区都有冻雨发生，但冻雨最容易发生在长江上游以南的西南地区（共 24 次，占冻雨总数的 33.80%）和长江下游的湖南、江西、安徽、江苏等省的局部地区（共计 19 次，占冻雨总数的 26.76%）。发生在长江流域的冻雨次数为 43 次，占冻雨总数的 60.56%。另外在新疆的局部地区（共 16 次，占冻雨总数的 22.54%）也比较容易发生冻雨。华南南部地区以及海南地区没有冻雨发生。冻毛毛雨的分布特征和冻雨类似，在研究的 2011~2013 年间，发生频次比冻雨小。这些分布特征结果与赵珊珊等（2010）、王遵娅（2011）、宗志平等（2013）研究得到的关于冻雨的分布特征基本一致。虽然所用数据站点的地理位置不同，出现最强冻雨和冻毛毛雨的时间和位置有所不同，但冰冻天气的地区分布特征基本一致。

在本文分析的冻雨、冻毛毛雨和冻雾三种冰冻天气中，冻雾是相对常见，分布较广的冰冻天气。除在华南部分地区以及三亚地区没有出现过冻雾外，在我国大部分地区都发生过冻雾。冻雾主要分布在我国长江以北的华北和华中地区（共 1243 次，占冻雾总数的 51.43%）、新疆北部（共 439 次，占冻雾总数的 18.16%）以及东北东部（共 364 次，占冻雾总数的 15.06%）等地。新疆北部的乌鲁木齐和伊宁是出现冻雾最集中的两个地区，分别为 194 次（8.03%）和 97 次（4.01%）。整体而言，冻雾的分布地区比冻雨和冻毛毛雨的分布地区偏北。

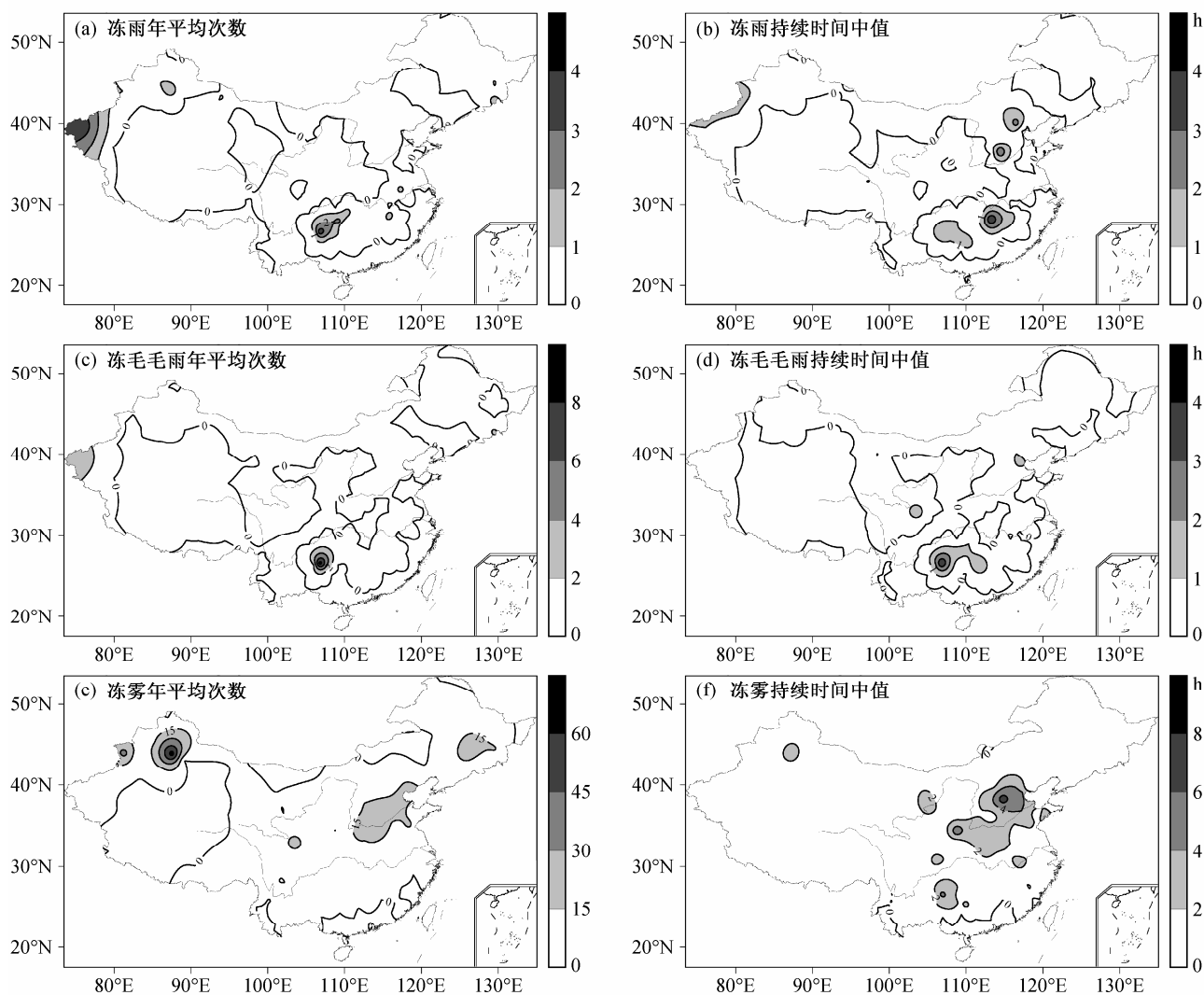


图2 2011~2013年冰冻天气的年平均次数:(a)冻雨;(c)冻毛毛雨;(e)冻雾。冰冻天气的持续时间中值:(b)冻雨;(d)冻毛毛雨;(f)冻雾
Fig. 2 Average annual number of events during 2011–2013 of (a) freezing rain, (b) freezing drizzle, and (c) freezing fog; median durations of (d) freezing rain, (e) freezing drizzle, and (f) freezing fog

由图2可以看出,冻雨和冻毛毛雨的年平均次数高值区和持续时间较长区有较好的对应(冻雨的年平均次数和持续时间的相关系数为0.63,冻毛毛雨的年平均次数和持续时间的相关系数为0.77,为强相关)。说明在冻雨或冻毛毛雨的频发区,冻雨或冻毛毛雨的持续时间也较长。如果不区分冻雨和冻毛毛雨,冻雨和冻毛毛雨的年平均次数和持续时间的相关系数为0.66。宗志平等(2013)研究发现冻雨的持续时间(以天数为单位)和冻雨站次数之间存在显著的相关性(相关系数0.73),与本文结论基本一致。结果间存在差异的主要原因是本文使用的是冻雨的过程次数和冻雨的持续时间(以小时数为单位)。另外,常规气象观测中雨淞包括冻雨

和冻毛毛雨,而本文使用的观测资料区分了冻雨、冻毛毛雨和冻雾等天气情况。

冻雾在西南地区的年平均次数较低,但冻雾在西南地区发生时其持续时间相对较长(冻雾的年平均次数和持续时间的相关系数为0.49,为中度相关)。说明在冻雾的少发区,其持续时间也可能较长。

3.2 冰冻天气时间分布特征

从冰冻天气在各月的分布情况看(如图3),冻雨、冻毛毛雨和冻雾最容易在冬季(12月、1月和2月)发生,在1月出现的比例最高,分别为110时次(占55.28%)、171时次(占67.06%)和3862时次(占38.24%),然后慢慢减少,至温度较暖的季节(5~9月)不会发生冰冻,从10月开始又迅

速增加。

这些结果与其他研究结果基本一致: 欧建军等 (2011) 发现我国冻雨一般从 11 月开始到来年 3 月结束, 以 1 月居多 (占 72%); 王遵娅 (2011) 发现冰冻主要发生在 11 月至来年 3 月, 尤其是冬季; 黄世芹等 (2012) 发现贵阳各地区冻雨主要发生在 1 月和 2 月; Changon et al. (2003) 发现美国冻雨主要发生在 12 月和来年 1 月; Cortinas et al. (2004) 分析美国和加拿大的数据, 发现冻雨主要发生在 1 月, 冻毛毛雨主要发生在 12 月。

虽然冰冻天气在 1 月出现的比例最高, 但是在纬度较北的新疆和东北地区, 冻雨和冻毛毛雨是在 2 月出现的比例最高, 分别为 30 时次 (占新疆和东北地区冻雨总数的 66.67%) 和 13 时次 (占新疆和东北地区冻毛毛雨总数的 56.52%); 冻雾是在 12 月出现的比例最高, 为 811 时次 (占新疆和东北地区冻雾总数 26.37%)。表明冰冻天气出现的月份在地区之间有一定区别。

各种冰冻天气的开始/结束时间和地点也有区别: 冻雨最早 11 月从新疆乌鲁木齐开始, 最迟 4 月初在内蒙古阿尔山结束; 冻毛毛雨最早 11 月从新疆乌鲁木齐开始, 最迟 4 月下旬在黑龙江大庆结束; 冻雾最早 9 月下旬从新疆乌鲁木齐开始, 最迟 5 月底在四川阿坝结束。

如图 4 所示, 冻雨和冻毛毛雨在凌晨 (00~07 时) 出现频率相对较多 (分别为 47.76% 和 52.76%), 冻雨和冻毛毛雨在该 8 个小时内的平均概率 (分别为 5.97% 和 6.60%) 比 24 小时内的平均概率 (4.17%) 高 43% 和 58%; 在下午 13 时出现的频率最低 (分别为 2.00% 和 0.61%), 之后随着地面温度的逐渐降低, 出现冻雨和冻毛毛雨的频率增加。

冻雾在早上 07 时出现的频率最大 (11.53%), 在下午 14 时出现的频率最低 (1.46%)。这些特征与加拿大纽芬兰地区、美国 and 加拿大地区 (Strapp et al., 1996; Cortinas, 2000, 2004; Houston and Changnon, 2007) 具有类似的变化趋势。

冰冻天气出现时间变化的可能原因是, 冰冻天气与局地温度密切相关。而局地温度受太阳辐射的影响, 具有明显的变化。在凌晨时温度较低, 容易出现冰冻天气, 而在下午 2 点左右一般是局地温度最高的时间, 不易出现冰冻天气。

3.3 冰冻天气持续时间统计特征

如图 5 所示, 单次冻雨、冻毛毛雨和冻雾的持

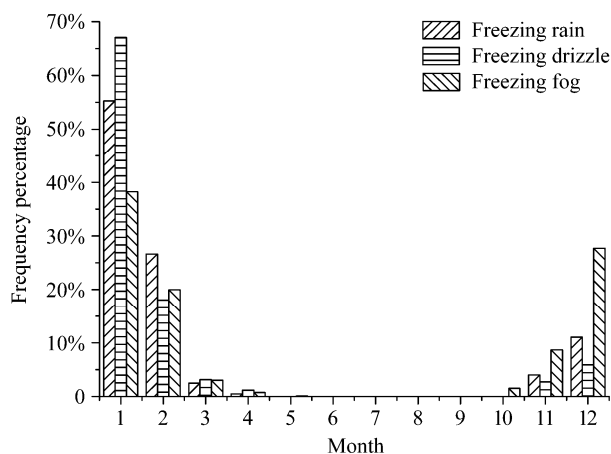


图 3 2011~2013 年冰冻天气出现的月频率百分比分布

Fig. 3 Monthly frequency percentage distribution of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events during 2011–2013

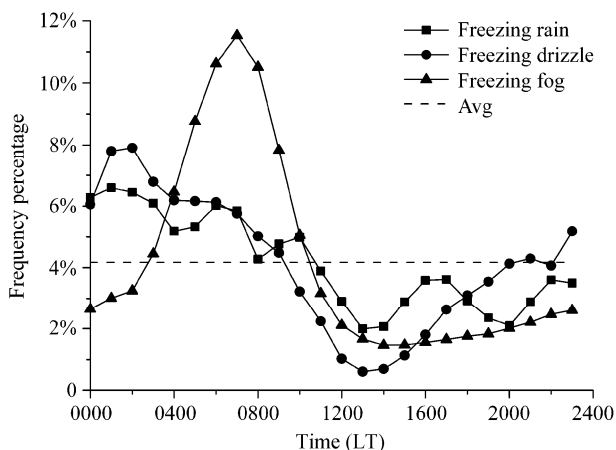


图 4 冻雨、冻毛毛雨和冻雾天气出现的时间频率百分比分布 (时间是以所在时区的地方时作为单位, 数据经过 5 点 3 次中心平滑处理。水平虚线为平均频率)

Fig. 4 Diurnal frequency percentage distribution of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events during 2011–2013 (time is expressed as LT, and data are derived after five-spot triple smoothing)

续时间一般不超过 2 小时 (分别为 73.24%, 68.75% 和 50.85%), 并呈指数迅速减少, 持续时间超过 5 小时的不到 27%, 持续时间超过 8 小时的不超过 10%。冻雨的持续时间比冻毛毛雨和冻雾的持续时间短。尽管冰冻天气的持续比较短, 但是持续时间超过 4 小时的冻雨、冻毛毛雨和冻雾所占比例分别为 7.04%, 15.00%, 27.43%。在 2011~2013 年间观测到的冻雨、冻毛毛雨和冻雾的持续时间最长分别达 34 小时 (贵阳, 2011 年 1 月 1 日 00 时~1 月 2 日 09 时)、23 小时 (贵阳, 2011 年 1 月 21 日 23 时~1 月 22 日 21 时) 和 91 小时 (乌鲁木齐, 2012

年 1 月 6 日 12 时~1 月 10 日 6 时)。尽管这些冰冻天气不常见,但长时间的冻毛毛雨和冻雨(尤其是冻雨)会产生最强的积冰,会对交通、电力、通讯等产生巨大影响,是非常危险的灾害性天气,如 2008 年的全国大范围的持续冰冻天气就是一个非常典型的例子。

3.4 冰冻天气发生的气象条件

3.4.1 温度、露点和温度露点差

数值模式对温度的预报能力要明显强于对降水量及降水相态的预报(宗志平等, 2013),同时地面温度决定了地面降水的最终相态。统计出现各类冰冻天气时的温度频率百分比分布如图 6 所示。

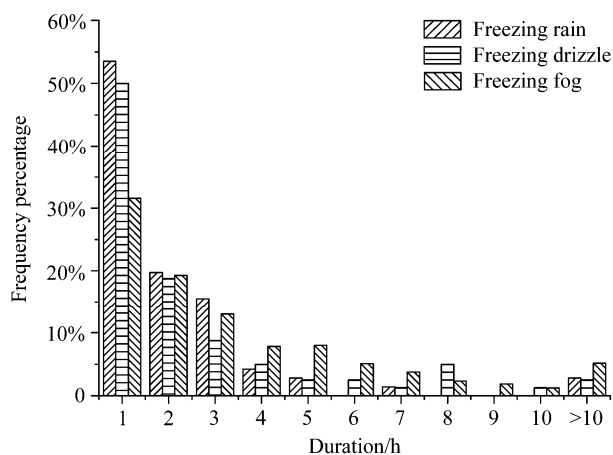


图 5 单次冻雨、冻毛毛雨和冻雾的持续时间频率百分比分布

Fig. 5 Duration frequency percentage distribution of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events

尽管大多数的冻雨、冻毛毛雨和冻雾发生在温度 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围,分别为 239 时次(占 96.37%)、298 时次(占 98.35%)和 11893 时次(占 82.02%)。冰冻天气更集中发生在温度 $-3\sim -1^{\circ}\text{C}$ 的范围内,冻雨、冻毛毛雨和冻雾所占比例分别为 64.92%, 82.51%和 39.89%。

在地面温度略低于 0°C 是最容易发生冰冻天气的温度。 -1°C 时各种冰冻天气发生概率最大,冻雨是 74 时次(占 29.84%),冻毛毛雨是 88 时次(占 29.04%),冻雾是 2459 时次(占 16.96%)。但在低于 -20°C 时仍有一定的几率(2.83%)会出现冻雾,甚至在温度 -38°C 时(呼伦贝尔, 2012 年 1 月 31 日 02 时)仍观测到冻雾的发生,此时温度已接近过冷水的理论极限温度(-40°C)。

在其他研究中关于出现冰冻天气的最高温度记录差别较大:贵州 1983~2003 年出现雨淞雾淞的平均最高气温为 1.78°C (孟蕾, 2010);我国 2008 年 1 月~2010 年 4 月的冻雨资料中,所有的冻雨地面温度均低于 0°C (欧建军等, 2011)。美国 1928~2001 年出现冻雨的最高温度为 5.6°C (Houston and Changnon, 2007)。如图 6 所示,在温度略高于 0°C ($1\sim 2^{\circ}\text{C}$)时也会出现冻雨、冻毛毛雨和冻雾,但概率较低(在 1°C 时出现冻雨、冻毛毛雨和冻雾分别是 8 时次、4 时次和 25 时次,所占比例分别为 3.23%, 1.32%和 0.17%;在 2°C 时仅出现过 1 时次冻毛毛雨,占 0.33%)。本研究中发现温度高于 0°C 时出现冻雨、冻毛毛雨和冻雾(共 38 个时次)的

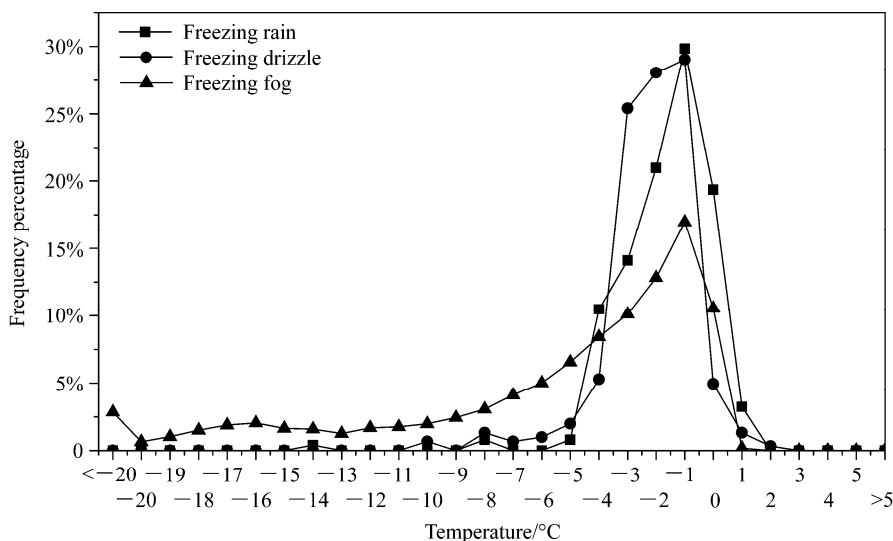


图 6 冻雨、冻毛毛雨和冻雾发生时的温度频率百分比分布图

Fig. 6 Temperature frequency percentage distribution of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events

成因分析如下:

(1) 记录温度与实际环境温度的区别。根据我国民航气象观测和报告行业标准, 气温和露点温度是以最近的整数摄氏度进行报告, 如记录温度为 1°C 时, 实际温度是在 $0.5\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ 范围内。此外, 机场观测是整个跑道综合区的温度, 距离地面有一定的高度 (一般为 $1.5\sim 2\text{ m}$), 大量研究表明 (Huffman and Norman, 1988; Bernstein, 2000) 在冻雨、冻毛毛雨和冻雾时一般都存在有逆温, 由于逆温的存在使实际地面的温度接近甚至在 0°C 以下。

(2) 站点的海拔高度较高。本研究中温度高于 0°C 时出现冰冻天气且机场海拔高度在 100 m 以上的为 24 例 (占 63.16%); 在 1959 年 1 月 18 日美国爱荷华州的苏城 (Sioux City) 出现冻雨的最高温度为 5.6°C (Houston and Changnon, 2007), 而苏城的海拔高度为 366 m 。王遵娅 (2011) 和欧建军等 (2011) 发现冰冻与地形有一定的关系。特殊的坡度/坡向、温度、湿度等条件共同构成冰冻天气的适宜环境。

(3) 站点靠近江河湖海, 水汽比较充沛。本研究中温度高于 0°C 时出现冰冻天气且机场距离江河湖海 50 km 内的有 13 例 (占 34.21%)。海拔高度高

和湿度大这两个因素占整个温度高于 0°C 时出现冰冻天气情况的 97%。

在以上因素的共同作用下, 导致在观测温度略高于 0°C 会出现冰冻天气。

冰冻天气发生时露点温度和温度露点差的频率百分比分布如图 7 所示。由图 7 可见, 露点温度在 $-4\sim -1^{\circ}\text{C}$ 是最容易发生冰冻天气的范围 (分别占 80.24%, 83.17%和 46.92%)。这些结果与 Cortinas (2000) 和 Houston and Changnon (2007) 分析美国五大湖和内陆结果基本一致。发生冰冻时露点温度差一般较小 (表明相对湿度较大), 露点温度差在 $0\sim 4^{\circ}\text{C}$ 时比较容易发生冰冻天气 (分别占 98.39%, 99.67%和 99.43%)。温度露点差为 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 时最容易发生冰冻天气 (分别占 77.02%, 85.81%和 65.80%)。露点温度和温度露点差没有比较明显的地区差别。

3.4.2 冰冻天气发生时的风向、风速特征

冰冻天气时的风向和风速会影响积冰强度和积冰速度, 表 2 是出现冰冻天气时风速概率百分比分布。由表 2 可见, 冻雨和冻毛毛雨发生时的平均风速在 $2\sim 3.9\text{ m s}^{-1}$ 频率最大, 分别占 42.34%和 63.28%, 风速在 $0\sim 5.9\text{ m s}^{-1}$ 条件下形成的冻雨和

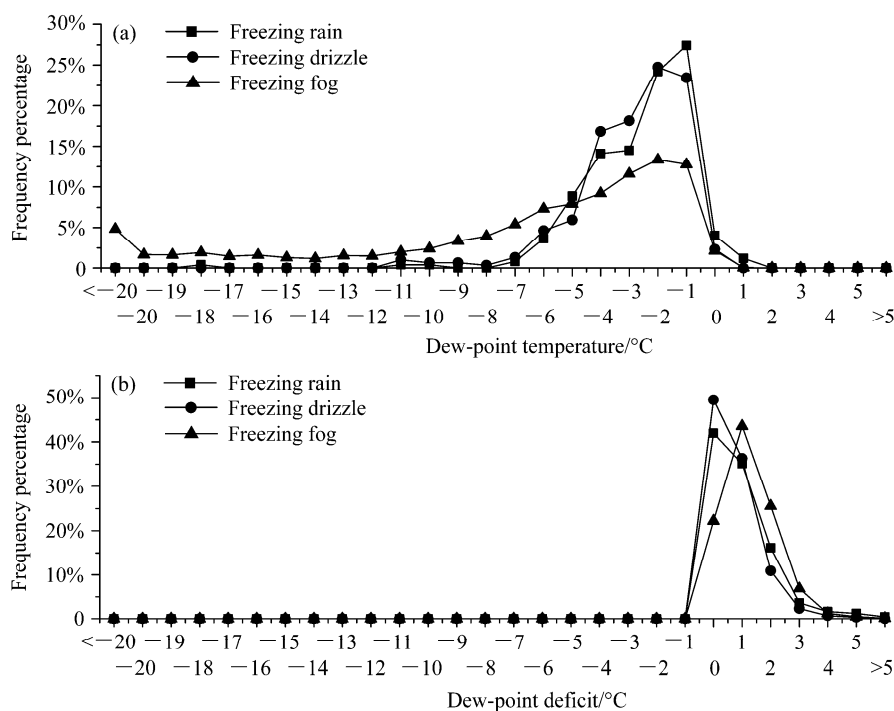


图 7 冻雨、冻毛毛雨和冻雾发生时 (a) 露点温度和 (b) 温度露点差频率百分比分布

Fig. 7 Frequency percentage distribution of (a) dew point temperature and (b) dew-point deficit when freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events occur

冻毛毛雨分别占总数的 85.71%和 96.72%，风速大于 10 m s^{-1} 以上形成的冻雨和冻毛毛雨只有 0.40%和 0.33%。并且华北地区的风速大于其他地区，东部地区的风速比西部的大（表略）。此外，出现冻雨时的加权平均风速为 3.36 m s^{-1} ，比冻毛毛雨（ 2.6 m s^{-1} ）和冻雾（ 1.49 m s^{-1} ）时大。

表 2 出现冰冻天气时风速概率百分比分布
Table 2 Frequency distribution of wind speeds of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events

风速/ m s^{-1}	出现冰冻天气时风速概率		
	冻雨	冻毛毛雨	冻雾
0–1.9	14.52%	18.36%	59.16%
2–3.9	42.34%	63.28%	33.71%
4–5.9	33.06%	15.08%	5.63%
6–7.9	6.05%	1.64%	1.18%
8–9.9	3.63%	1.31%	0.21%
≥ 10	0.40%	0.33%	0.03%

这些结果与其他研究结果基本一致：王遵娅等（2011）利用日观测资料发现最适宜冰冻发生的日平均风速是 1.5 m s^{-1} ，冰冻在日平均风速 6 m s^{-1} 条件下形成的样本数占到了总样本数的 90%。Houston and Changnon（2007）利用小时观测资料研究发现，出现冻雨的风速 $4\sim 5.9\text{ m s}^{-1}$ 最多，并且美国北部比中部和南部稍大。本文分析得到的冰冻天气时风速比王遵娅等（2011）用日平均风速得到的结果更合理，比 Houston and Changnon（2007）的风速小。表明冰冻天气时的风速在年纪之间会有变化，地区之间也会有区别。

冰冻天气时的风向概率分布如表 3 所示。由表 3 可见，出现冰冻天气时的风向以东北风和北风为主（冻雨，冻毛毛雨和冻雾分别为 70.35%，81.22%和 46.98%）。冻雨和冻毛毛雨在东北风发生的比例较多，分别为 37.61%和 44.40%。冻雾在北风的情

表 3 出现冰冻天气时风向概率百分比分布
Table 3 Frequency distribution of wind directions of all freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog events

风向	出现冰冻天气时风向概率		
	冻雨	冻毛毛雨	冻雾
N ($337.5^{\circ}\sim 22.5^{\circ}$)	32.74%	36.82%	35.45%
NE ($22.5^{\circ}\sim 67.5^{\circ}$)	37.61%	44.40%	11.53%
E ($67.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}$)	11.50%	8.30%	9.58%
SE ($112.5^{\circ}\sim 157.5^{\circ}$)	1.33%	1.44%	6.12%
S ($157.5^{\circ}\sim 202.5^{\circ}$)	2.65%	0.72%	10.55%
SW ($202.5^{\circ}\sim 247.5^{\circ}$)	1.33%	3.25%	7.65%
W ($247.5^{\circ}\sim 292.5^{\circ}$)	5.31%	2.17%	10.20%
NW ($292.5^{\circ}\sim 337.5^{\circ}$)	7.52%	2.89%	8.91%

况下出现的概率最大，为 35.45%。

冻雨和冻毛毛雨的风向在地区间也会有区别：出现冻雨时，新疆地区以东风（34.09%）和西风（20.45%）为主；出现冻毛毛雨时，东北地区以西风（46.15%）和北风（38.46%）为主；华东地区以西北风（38.46%）和北风（38.46%）为主；其他地区以东北风和北风为主（表略）。这说明我国的冻雨和冻毛毛雨一般发生在冷空气一侧。

冻雾的风向在区域间的差别不大，除华南和西南地区以北风（分别为 58.67%和 59.96%）为主，其他各地区各风向都有可能发生冻雾，但以北风相对较多。

3.4.3 冰冻天气发生时的天气特征

统计出现冰冻天气时的伴随天气（如表 4 所示），分析形成冰冻天气可能过程，为预测冰冻天气和地面积冰提供参考。

表 4 出现冰冻天气时伴随的天气概率百分比分布（由于冰冻天气时可能同时伴随多种天气现象，各种伴随天气比例累计可能会超过 100%）

Table 4 Frequency distribution of concurrent weather phenomena observations (columns may not add up to 100% because more than one type of weather phenomena can be reported)

	出现冰冻天气时伴随的天气概率		
	冻雨	冻毛毛雨	冻雾
雨	—	—	0.56%
毛毛雨	—	—	0.70%
雾	10.08%	13.44%	—
轻雾	51.21%	70.49%	0.03%
雪	17.34%	0.98%	15.06%
无其他天气	30.24%	16.07%	79.20%

从表 4 发现：冻雨和冻毛毛雨发生时，一般同时会有雾或轻雾（分别占 61.29%和 83.93%），冻雨和冻毛毛雨发生时无其他天气也有较高的比例（分别占 30.24%和 16.07%）；冻雾出现时，一般不会伴随其他天气（占 79.20%），如有其他天气主要是雪为主（占 15.06%）。

Cortinas et al.（2004）研究美国和加拿大的冰冻天气特征时，表明：冻雨和冻毛毛雨一般不伴随其他天气（分别占 69%和 79%）。与本文结果差别较大，表明各个国家或地区之间存在较大的区别。

很多研究结果表明（Huffman and Norman, 1988; Strapp et al.,1996）：冻毛毛雨是缺少暖层的情况下，碰并凝结形成。在相对湿度比较大的环境

下,通过凝结增长形成一定尺度的雾(或云)滴,由于适合的温度(如前文中分析在 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$ 范围内),形成过冷小水滴,后通过碰并过程形成不同大小的雨滴,最终形成冻雨或冻毛毛雨。

如果有雪的存在,大气中会形成大量的冰晶。由于冰晶表面的饱和水汽压低于同温度下水滴表面的饱和水汽压,在冰水共存时,如果云中没有外来水汽补充,过冷水滴将快速蒸发,而冰晶会快速长大成雪降落出大气,导致冻雨或冻毛毛雨的停止。

4 结论

本文利用我国民航机场的一小时或半小时一次的航空气象地面例行观测和特殊观测资料,对冻雨、冻毛毛雨和冻雾的出现频率、变化规律、气象条件等特征进行精细分析研究,得到以下结论:

(1)在我国大部分地区都有冰冻天气,集中分布在我国的中部、东北、西南和新疆等地区。冻雨和冻毛毛雨集中发生在长江上游以南的西南地区 and 长江下游的湖南、江西、安徽、江苏等省的局部地区以及新疆部分地区。冻雾主要分布在我国长江以北的华北和华中地区、新疆北部和东北东部等地。冻雾的分布地区相对于冻雨和冻毛毛雨的分布地区偏北。冻雨和冻毛毛雨的频发区,其持续时间较长。而在冻雾的少发区,其持续时间也可能较长。

(2)我国冰冻天气最容易在冬季(12月、1月和2月)发生,在1月出现的比例最高。冰冻天气在凌晨(00~07时)出现频率相对较多,午后(13~14时)出现频率最低。

(3)单次冻雨、冻毛毛雨和冻雾的持续时间一般不超过2小时(分别为73.24%、68.75%和50.85%)。但持续时间超过4小时的冻雨、冻毛毛雨和冻雾所占比例分别为7.04%、15.00%和27.43%。

(4)在地面温度略低于 0°C (-1°C)是最容易发生冰冻天气的温度(-1°C 时各种冰冻天气发生频率,冻雨是29.84%,冻毛毛雨是29.04%,冻雾是16.96%)。冰冻天气大多发生在温度 $-3\sim -1^{\circ}\text{C}$ 的范围内(冻雨、冻毛毛雨和冻雾所占比例分别为64.92%、82.51%和39.89%)。但在海拔高度高、相对湿度大以及逆温的共同作用下,在温度略高于 0°C ($1\sim 2^{\circ}\text{C}$)时仍观测到冰冻天气。

(5)露点温度在 $-4\sim -1^{\circ}\text{C}$,温度露点差在 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ 最容易发生冰冻天气。

(6)冻雨和冻毛毛雨发生时的平均风速在 $2\sim$

3.9 m s^{-1} 频率最大,分别占42.34%和63.28%。华北地区的风速大于其他地区,东部地区的风速比西部的大。出现冰冻天气时的风向以东北风和北风为主。

(7)冻雨和冻毛毛雨发生时,一般同时会有雾或轻雾(分别占61.29%和83.93%);冻雾出现时,一般不会伴随其他天气(占79.20%)。

致谢 感谢北京师范大学刘新罡副教授、评审专家及编委对本文提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Bernstein B C. 2000. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events [J]. *Wea. Forecasting*, 15 (5): 485–508.
- Bernstein B C, Brown B G. 1997. A climatology of supercooled large drop conditions based upon surface observations and pilot reports of icing [C]// *Preprints, Seventh Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 82–87.
- Branick M L. 1997. A climatology of significant winter-type weather events in the contiguous United States, 1982–94 [J]. *Wea. Forecasting*, 12 (2): 193–207.
- Changnon S A. 2003. Characteristics of ice storms in the United States [J]. *J. Appl. Meteor.*, 42 (5): 630–639.
- Cortinas J V Jr. 2000. A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128 (10): 3574–3588.
- Cortinas J V Jr, Bernstein B C, Robbins C C. et al. 2004. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976–90 [J]. *Wea. Forecasting*, 19 (2): 377–390.
- Glickman T S. 2000. *Glossary of Meteorology* [M]. 2nd ed. New York: Amer. Meteor. Soc., 855pp.
- Hanesiak J M, Stewart R E. 1995. The mesoscale and microscale structure of a severe ice pellet storm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (11): 3144–3162.
- Houston T G, Changnon S A. 2007. Freezing rain events: A major weather hazard in the conterminous US [J]. *Natural Hazards*, 40 (2): 485–494.
- Huffman G J, Norman G A Jr. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116 (11): 2172–2182.
- 黄世芹, 李扬, 王珺, 等. 2012. 1981–2010 年贵阳冬季冻雨日数时空分布变化特征 [J]. *贵州气象*, 36 (5): 19–23. Huang Shiqin, Li Yang, Wang Jun, et al. 2012. The characteristics of distribution and temporal changes with freezing days in Guiyang winter from 1981 to 2010 [J]. *Journal of Guizhou Meteorology (in Chinese)*, 36 (5): 19–23.
- 蒋兴良, 孙才新, 顾乐观, 等. 1998. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型 [J]. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 21 (2): 16–19. Jiang Xingliang, Sun Caixin, Gu Leguan, et al. 1998. Power lines icing characteristics of the Three Gorges District and a model of the accumulation of ice on electric on electric power lines [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition) (in Chinese)*, 21 (2): 16–19.
- 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.
- 廖玉芳, 张剑明, 李英. 2012. 湖南近 60 年雨淞的气候特征 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 594–606. Liao Yufang, Zhang Jianming, Li Ying. 2012. Climatological features of the glaze in Hunan Province in recent 60 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 594–606.
- Makkonen L. 2000. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structure [J]. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 358 (1776): 2913–2939.
- 孟蕾. 2010. 雨淞雾凇形成机制的观测和冻雨模式初步研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Meng Lei. 2010. The observation of formation mechanism of rime and glaze and preliminary study of freezing rain model [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析 [J]. 高原气象, 30 (3): 692–699. Ou Jianjun, Zhou Yuquan, Yang Qi, et al. 2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature–moisture structure of freezing rain in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (3): 692–699.
- Robbins C C, Cortinas J V Jr. 1996. A climatology of freezing rain in the contiguous United States: Preliminary results [C]// Pre-prints, 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA, Amer. Meteor. Soc., 124–126.
- Roberts E, Stewart R E. 2008. On the occurrence of freezing rain and ice pellets over the eastern Canadian Arctic [J]. Atmospheric Research, 89: 93–109.
- Strapp J W, Stewart R A, Isaac G A. 1996. A Canadian climatology of freezing precipitation and a detailed study using data from St. John's, Newfoundland [C]// Proc. FAA Int. Conf. on Aircraft In-flight Icing, Vol. 2, Springfield, VA, FAA, DOT/FAA/AR-96/81: 45–56.
- Stuart R A, Isaac G A. 1999. Freezing precipitation in Canada [J]. Atmos.–Ocean, 37 (1): 87–102.
- 孙燕, 尹东屏, 宗培书. 2013. 江苏冰冻灾害的气候特征 [J]. 自然灾害学报, 22 (2): 165–171. Sun Yan, Yin Dongping, Zong Peishu. 2013. Climate characteristics of freezing disaster in Jiangsu [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 22 (2): 165–171.
- 谭冠日, 严济远, 朱瑞兆. 1985. 应用气候 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 3–56. Tan Guanri, Yan Jiuyan, Zhu Ruizhao. 1985. Applied Climatology (in Chinese) [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 3–56.
- 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 Shiyang, 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.
- 王守礼. 1993. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 7–44. Wang Shouli. 1993. Study of the Wire Ice Coating in the High Altitude Regions of Yunnan Province (in Chinese) [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 7–44.
- 王遵亲. 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.
- 王遵亲, 赵珊珊, 张强. 2011. 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, 30 (1): 158–163. Wang Zunya, Zhao Shanshan, Zhang Qiang. 2011. Meteorological conditions in ice freezing day of China and its discriminate model [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (1): 158–163.
- 吴兑. 2008. 关于冻雨和雨淞、雾凇之我见 [J]. 广东气象, 30 (1): 12–13. Wu Dui. 2008. Discussion on the distinguishing of freezing rain, rime and glaze [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 30 (1): 12–13.
- 严小冬, 吴战平, 古书鸿. 2009. 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, 28 (3): 694–701. Yan Xiaodong, Wu Zhanping, Gu Shuhong. 2009. Analyses on the space-time distribution characteristics and their influence factors of freezing rain in Guizhou Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 694–701.
- 杨利群. 1999. 贵州暴雨洪涝、秋雨和凝冻的气候特征及灾情分析 [J]. 贵州气象, 23 (4): 3–8. Yang Liqun. 1999. Climatic characters and situation analysis of rain storm and flood, autumn persistent rain falls and rime in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Meteorology (in Chinese), 23 (4): 3–8.
- 杨萍, 肖子牛, 刘伟东. 2013. 北京气温日变化特征的城郊差异及其季节变化分析 [J]. 大气科学, 37 (1): 101–112. Yang Ping, Xiao Ziniu, Liu Weidong. 2013. Comparison of diurnal temperature variation in urban and rural areas in Beijing and its seasonal change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 101–112.
- 叶茵, 杜小玲, 严小冬. 2007. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析 [J]. 贵州气象, 31 (6): 11–13, 25. Ye Yin, Du Xiaoling, Yan Xiaodong. 2007. Guizhou ice rain space time distribution and corresponding circulation signature analysis [J]. Journal of Guizhou Meteorology (in Chinese), 31 (6): 11–13, 25.
- 张家诚. 1991. 中国气候总论 [M]. 北京: 气象出版社, 199–201. Zhang Jiacheng. 1991. Pandect of Climate in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 199–201.
- 张宇发. 1999. 贵州气候灾害近 50 年变化趋势 [J]. 成都气象学院学报, 14 (1): 88–92. Zhang Yufa. 1999. Variation trend of climatic calamities in the past 50 years in Guizhou [J]. Journal of Chengdu Institute of Meteorology (in Chinese), 14 (1): 88–92.
- 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.
- 中国民用航空局空管行业管理办公室. 2007. 民用航空气象地面观测规范 [S]. 148pp. Industry Management Office of Civil Aviation ATM industry management. 2007. Civil aviation meteorological surface observation specification [S]. 148pp
- 中国民用航空局. 2007. 中华人民共和国民用航空行业标准. MH/T 4016.1–2007 民用航空气象第 1 部分: 观测和报告 [S]. 3–12. Civil Aviation Administration of China. 2007. People's Republic of China Civil Aviation Industry Standard. MH/T 4016.1–2007 Civil aviation meteorology. Part 1: Observating and reporting [S]. 3–12
- 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. Zong Zhiping, Ma Jie, Zhang Hengde, et al. 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 39 (7): 813–820.