康丽莉，邓芳萍，岳平，等，2017. 一种浙江省冻雨落区的推算方法[J]. 气象，43(6)：756-761.

一种浙江省冻雨落区的推算方法*

康丽莉[1] 邓芳萍[1] 岳 平[2] 姜文东[3] 王灿灿[2]

1 浙江省气象科学研究所，杭州 310000

2 国网丽水供电公司，丽水 323000

3 国网浙江省电力公司，杭州 310027

提 要： 2008 年初浙江省出现全省性的大范围强冻雨天气，在输电线路上形成很厚的覆冰，致使浙江电网遭受巨大的损失。然而，浙江省却仅有三分之一的气象站观测到冻雨，持续时间也很短。本文利用全球再分析资料 ERA-Interim 结合浙江电网覆冰灾情资料，分析了 2008 和 2013 年的两次强冻雨过程。研究表明浙江省强冻雨发生时具备冷暖冷的层结结构，且中间暖层气温＞0℃，但相比湖南省，浙江省的暖层中心气温稍低，下层冷层厚度略厚，暖层中的液态水进入到下层冷层后易被冻结，落到低海拔地面为冰粒，或者低海拔地面层气温高于 0℃，冻雨落到地面为降雨，所以冻雨期间浙江省绝大多数气象站（海拔在 200 m 以下）观测不到雨凇，观测到的多是冰粒或降雨；而在海拔较高的山区，冷层厚度变薄，液态水被冻结的概率大大降低，而且山区地面气温多低于 0℃，有利于冻雨落在山区地面形成雨凇，因此浙江省冻雨多出现在浙中海拔 400 m 以上和浙南海拔 600 m 以上的山区。根据浙江省冻雨的特点，采用全球再分析资料进行冻雨落区推算，结果与浙江电网实际的覆冰灾情吻合得较好。本研究利用输电线路覆冰厚度确定冻雨强弱和分布，采用再分析资料推算冻雨落区，为地形起伏度较大的省份开展冻雨研究，进行冻雨监测和预报提供一条新的思路。

关键词： 浙江省，冻雨，雨凇，再分析资料，冻雨落区

中图分类号： P456 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.012

A New Method of Calculating Falling Zone of Freezing Rain in Zhejiang

KANG Lili[1] DENG Fangping[1] YUE Ping[2] JIANG Wendong[3] WANG Cancan[2]

1 Zhejiang Meteorological Science Research Institute, Hangzhou 310000

2 State Gird Lishui Power Supply Company of Zhejiang, Lishui 323000

3 State Gird Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310027

Abstract: In 2008, the thick ice-coating caused by the severe freezing rain covered power transmission line in Zhejiang, leading to enormous damages to Zhejiang power grid. However, only one third of the weather stations observed the glaze with a short duration. In this paper, two severe freezing rain processes which occurred in 2008 and 2013 were analyzed using the global reanalysis data ERA-Interim and the disaster records of ice-coating on Zhejiang power grid. The results show that there are three layers of cold-warm-cold with the warm layer's temperature above 0℃ during the heavy freezing rain process in Zhejiang Province. In Zhejiang, the liquid water falling from the warm layer would be frozen into ice particles because the temperature in warm layer is lower and the thickness of the bottom ice layer is thicker. Sometimes, the ground temperature is above 0℃, so rain would be observed at weather stations during freezing rain. However, the thickness of bottom ice layer become thinner at high elevation, then tiny liquid water can be frozen into ice particles after it passes through the bottom ice layer. The freezing rain can be found mostly above 400 m elevation of central Zhejiang and above 600 m elevation of southern Zhejiang. According to the

* 浙江省气象局科技项目（2013ZD09）和浙江省电力公司科技项目（微气象数据的架空线路单点覆冰模型研究及分析）共同资助

2016 年 1 月 7 日收稿； 2017 年 4 月 20 日收修定稿

第一作者：康丽莉，主要从事应用气象研究. Email：jennykkll@aliyun.com

freezing rain characteristics in Zhejiang, the falling zone of freezing rain can be calculated based on the global reanalysis data, and the results match the disaster records of ice-coating well. In general, this is a new method for freezing rain monitoring and forecasting, especially for some mountainous provinces like Zhejiang.

Key words: Zhejiang Province, freezing rain, glaze, global reanalysis data, falling zone of freezing rain

引　言

2008 年初,我国南方地区发生历史罕见的大范围持续性低温冰冻雨雪天气过程,给南方多个省份造成严重影响(王凌等,2008;潘娅瑛等,2009),其中,浙江省也是受灾最重的省份之一,尤其是对浙江电网造成巨大的破坏(顾骏强等,2010;李庆峰等,2008;李登文等,2011)。根据灾后评估,浙江省大部分地市在海拔 300～400 m 以上的山区都出现了严重的覆冰致倒塔的事故,包括浙东沿海的宁波、台州,以及浙南的丽水和温州。经事故现场踏勘分析,此次灾害的最主要致灾因子为冻雨。

国内大量文献对 2008 年初的冰冻雨雪过程从不同角度进行了深入研究分析(丁一汇等,2008; 王亚非等,2008;杨贵名等,2008;陶玥等,2012;黄小玉等,2008),文献中对这次冻雨落区的分析都是基于气象站观测的雨凇日数来划分的。由于,浙江省在 2008 年这次冰冻雨雪过程中有一半以上的测站未出现雨凇,出现雨凇最多的 4 个测站也仅有 5 d 观测到雨凇,与贵州、湖南和江西等省多个气象站出现十几天以上雨凇日数的情况相去甚远,因而在冻雨研究文献中浙江省都被划在冻雨区外(孙建华和赵思雄,2008;欧建军等,2011;黎惠金等,2011;宗志平和马杰,2011;宗志平等,2013),但这与浙江省实际所遭受的冻雨灾害是严重不符的。2013 年 1 月,浙江沿海的宁波地区,在海拔 400 m 左右的山区再次出现严重的冻雨覆冰,覆裹在输电线路上的覆冰厚度可达 20 mm 以上,然而附近的常规气象站当时并未观测到雨凇。

经分析发现,浙江省 68 个气象站中有 65 个都分布在海拔 200 m 以下的城镇区域,而冻雨灾情却出现在海拔 400 m 以上的山区,因此,尽管山区有冻雨发生,但附近的气象站内观测不到雨凇现象。浙江省是一个“七山一水二分田”的省份,地形起伏度大。对浙江省数字高程数据(DEM)按网格点进行统计,约有 32%的格点是位于海拔 400 m 以上的山区,从浙江省气象站 43 年累计的雨凇日数分布来看,除杭嘉湖平原和舟山群岛外,其他地区都有可能会受到冻雨的影响,可见冻雨对浙江省的影响是不容忽视的。2000 年后随着浙江电网规模的快速增长,浙江省高电压等级线路遍布全省大部分地区,而且由于山多地少,输电线路大多在海拔较高的山区走线,2008 年的覆冰过程对其造成巨大损失。因而,电力部门非常重视覆冰灾害对电网的影响,对覆冰灾害现场的覆冰进行了详细的调查和分析,积累了较为翔实的覆冰灾情资料。因此,本文收集了浙江省电力部门近年来的覆冰灾情资料,结合浙江省常规气象站多年雨凇观测资料,利用高分辨率(0.75°×0.75°)的全球再分析资料 ERA-Interim,对浙江省冻雨的特点进行深入分析,并进一步提出对浙江省实际冻雨落区的推算方法,为多山地丘陵地区冻雨监测和预报提供研究思路。

1　2008 年浙江电网覆冰灾情分析

由图 1 可知,2008 年初的冰冻雨雪过程中,浙江省 63 个气象站中仅有 4 个气象站观测到的雨凇日数为 5 d,5 个气象站雨凇日数为 3 d,3 个气象站雨凇日数为 2 d,其他气象站雨凇日数仅为 1 d 或者

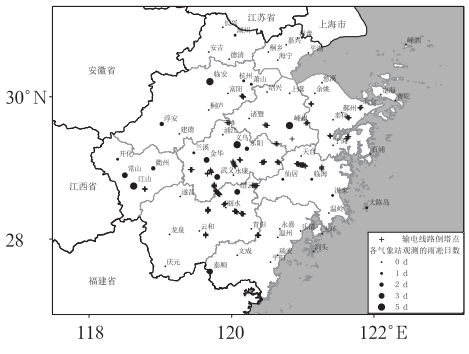

图 1　2008 年浙江电网覆冰倒塔点和气象站雨凇日数分布图

Fig. 1　Distributaion of the spots of electric towers falling down caused by ice coating and the glaze data observed by weather stations in Zhejiang during 2008

没有观测到雨凇。然而,浙江电网除在杭嘉湖平原和舟山地区外,均出现了严重的覆冰灾害,甚至在多个地市出现大量输电线路倒塔断杆的事故。例如,宁波地区的气象站虽然没有观测到雨凇,但有多处山区线路发生倒塔事故。2013年虽然宁波北仑、丽水和台州都出现了明显的电网覆冰,但同期没有一个气象站观测到雨凇现象。说明浙江省气象站由于海拔较低,在雨凇观测方面确实存在严重低估的情况。

2 浙江省冻雨期间的层结分析

目前,大多数文献对冻雨有较为一致的研究结论,认为冻雨产生需要满足两个层结条件:在中低层存在一个融化层(温度>0℃)和一个贴近地面的冷冻层(温度<0℃),即出现冻雨的区域上空有明显的冷暖冷的层结特征(罗海波等,2010;漆梁波,2012)。据统计,在2008年1月的冻雨过程中,贵州、湖南的覆冰灾情最为严重,而湖南和浙江的地形地势较为相似,1月26日两个省均出现了大范围冻雨。下文就沿湖南长沙气象站(112.9°E)和浙江杭州气象站(120.2°E)经度绘制1月26日02时气温和水汽通量的垂直剖面图,对比分析两个站的差异,剖析浙江省真实的冻雨情况。

沿长沙站(112.9°E)的剖面图显示(图2a),湖南省在25°~29°N的上空都存在冷暖冷的层结,对应有很强的水汽通量,逆温层暖层非常深厚,说明湖南省中部和南部大部分地区均符合发生冻雨的天气条件,与当日的气象站观测的雨凇和湖南实际的冻雨覆冰情况也是相符的。沿杭州站(120.2°E)的剖面图显示,在28°~30°N也存在与长沙站相似的层结特点,但当日浙江省气象站仅有7站有雨凇,约有一半的气象站(32站)观测到冰粒,然而,浙江省中部大部分地区的电网却出现了严重的冻雨覆冰。马晓刚等(2010)以单一雨滴为例,分析了从暖层的雨滴进入冷层后的自身温度变化情况,认为暖层的温度、下层冷层的温度和厚度对雨滴落地之前自身的温度影响很大,如果雨滴落地之前气温足够低,可能会被冻结为冰粒。由此可见,长沙站上空暖层深厚,暖层中液态水温度高,在底层冷层中被冻结的可能性小,因此可以在低海拔的气象站观测到雨凇现象。杭州站上空的暖层稍弱,暖层中的液态水温度较低,在进入冷层后,经过深厚的底层冷层落到低海拔地面前可能就已经冻结为冰粒,因此气象站多观测到冰粒,而非雨凇。尽管浙江省低海拔的气象站观测不到雨凇,但在海拔较高的山区,从暖层下落到冷层的液态水则不需经太长路程就能到达山区地面,这样液态水被冻结成冰粒的概率大大降低,而直接以过冷却水的状态落到地物上冻结为雨凇,导致浙江省高海拔地区出现严重的冻雨覆冰。

2013年1月6日,湖南省和浙江省又出现了冻雨。为了进一步确认空中层结结构与冻雨的关系,绘制了2013年1月6日20时沿长沙站(112.9°E)和杭州站(120.2°E)的温度和水汽通量垂直剖面图(图3),由于宁波北仑在这次冻雨过程中出现严重的冻雨覆冰,因此同时绘制了沿北仑站(121.8°E)的剖面图。由图3a可知,湖南省低空存在典型的冷暖冷层结,但对应的水汽通量很弱,说明其冻雨也比较弱,再加上地面气温在0℃以上,低海拔地面不会出现雨凇现象,事实也证明这次湖南未出现明显的覆冰灾情。杭州站低空也存在冷暖冷的逆温层结,上空对应着水汽通量的高值中心,比长沙站的水汽通量大,但与2008年的相比,要弱得多,说明在浙江省中部出现明显的冻雨,但不重。浙江电网灾情记录也表明在浙江省中部的金华、丽水和台州的山区确实出现明显的冻雨覆冰。从北仑站的剖面图分析,其低空确实有冷暖冷的逆温层结,上空对应的水汽通量值也比杭州站上空的大。当日北仑气象站地面气温在0℃以上,但到海拔400 m左右的山区气温则在0℃以下,低空暖层虽不深厚,但暖层高度低,底层冷层也较薄,山区出现较强冻雨的概率很高。另外,在该区域海拔400 m左右山区的水汽通量值也较大,在2 $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$以上,根据现场实地踏勘,当时山区有毛毛细雨,能见度很低,风速较大,可能是其在短时间内形成严重覆冰的主要原因。

综上所述,浙江省出现冻雨时低空确实存在冷暖冷的逆温层结,对应的上空水汽通量>8 $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$时,冻雨覆冰将比较明显。然而,即使有冻雨发生,从逆温层下落的液态水降落到地面是否形成雨凇是不确定的。如果地面气温在0℃以上,冻雨落到地面上为降雨,如果地面气温在0℃以下,若冷层太厚,冻雨到地面之前就被冻结,落到地面上是冰粒。但在浙江省海拔较高的山区,气温一般会降到0℃以下,相应的冷层厚度变薄,出现冻雨覆冰的可能性变大。由于冻雨对浙江省山区影响较

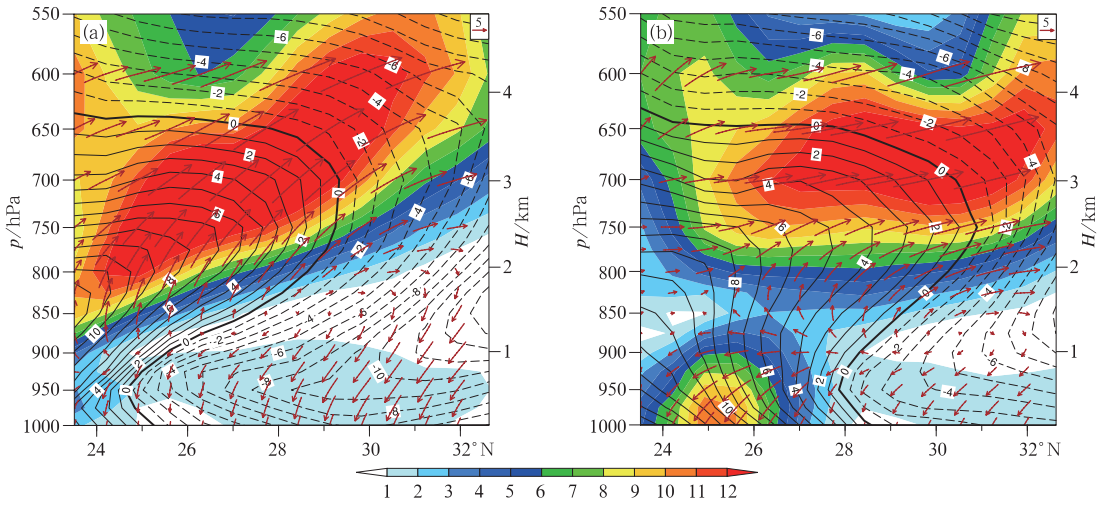

图 2　2008 年 1 月 26 日 02 时沿长沙站(a,112.9°E)和杭州站(b,120.2°E)的垂直剖面图

(填色为水汽通量,单位:g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1};红色矢量为风速,单位:m·s^{-1};等值线为气温,单位:℃)

Fig. 2　Vertical cross-section along Changsha Observatory (a, 112.9°E) and Hangzhou Observatory (b, 120.2°E)

(vapor flux, shaded area, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}; wind, vector arrow, unit: m·s^{-1}; temperature, black line, unit: ℃)

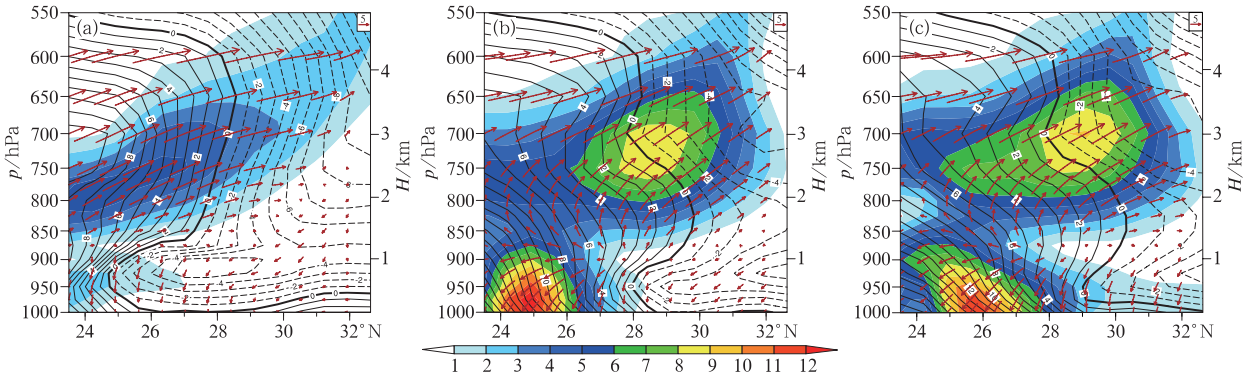

图 3　同图 2,但为 2013 年 1 月 6 日 20 时沿长沙站(a, 112.9°E)、杭州站(b, 120.2°E)和北仑站(c, 121.8°E)

Fig. 3　Same as Fig. 2, but along Changsha Observatory (a, 112.9°E), Hangzhou Observatory (b, 120.2°E) and Beilun Observatory (c, 121.8°E) at 20:00 BT 6 January 2013

大,而一般气象站观测不到,因此,下文提出一种利用再分析资料进行冻雨落区推算的方法。

3　浙江省冻雨落区的推算

3.1　冻雨推算方法

欧洲中心的全球再分析资料 ERA-Interim (0.75°×0.75°),水平分辨率较高,资料的垂直分层有 37 层,这里用其来推算浙江省冻雨落区。冻雨落区推算的思路为:计算每个时次每一个格点上空的层结结构,如果满足冻雨出现的条件,就认为该时次该格点出现了一次冻雨;然后对每一个格点在计算时段里出现冻雨的次数进行累加,用累加后冻雨次数的多少来判断该格点冻雨的强弱,即次数多则冻雨强。具体的推算方法是,从最底层开始向上计算每个格点是否满足冷暖冷层结,并对暖层和底层冷层厚度设定一定的阈值。在马晓刚等(2010)的研究中,雨滴从暖层进入底层冷层变成过冷雨滴,底层冷层厚度至少在 430 m 以上,再分析资料 ERA-Interim 的垂直分层中相邻两层厚度大致为 500 m,因此本研究中底层冷层厚度最低取 500 m。冻雨期间的暖湿气流下界在低空 2000 m 左右,下层冷层厚度最大能取 2000 m,所以,本研究中底层冷层厚度取

500～2000 m。中间暖层厚度一般都比较深厚，这里取大于 500 m。根据设定的阈值，对每个格点进行计算，如果满足条件，就认为该格点出现了一次冻雨，并把底层冷层出现的底部高度，作为冻雨出现的最低海拔高度。由于再分析资料 1 天有 4 个时次的数据，因此推算结果 1 天最多可以出现 4 次冻雨，而气象站观测的雨凇日数，不管其持续时间长短都只记录 1 次，因此，利用再分析推算的冻雨日数与气象站的雨凇日数是有区别的。

3.2 冻雨推算结果分析

图 4 为利用再分析资料计算的 2008 年 1 月 11—31 日(1 天 4 个时次，共 84 个时次)的冻雨出现频数与冻雨出现高度的分布图。其推算结果与罗海波等(2010)的结论基本一致，贵州、湖南、江西和浙江的大部分地区出现 20 个时次以上的长时间的冻雨。其中，湖南中南部和江西中西部最严重，可达 40 个时次以上，浙江中部也有 30 个时次以上。推算结果与文献中电网的覆冰灾情是吻合的。图 4b 是推算的冻雨出现的最低海拔高度。湖南省冻雨出现的最低海拔高度很低，其冻雨落区内的低海拔地面基本都能观测到雨凇，因而气象站观测到的雨凇日数最多；江西省出现冻雨的最低海拔高度略高，大部分地区在海拔 300 m 左右，所以江西省内气象站观测到的雨凇日数略偏少；浙江省出现冻雨的最低海拔高度最高，大部分地区在海拔 400～800 m，与浙江电网覆冰灾情分布情况非常吻合，但由于浙江省气象站绝大部分海拔位于 200 m 以内，同期观测到的雨凇日数显著偏少。从 2008 年的推算结果来看，110°E 以东地区，以湖南、江西和浙江的冻雨出现次数最多，明显高于南北两侧各省。

利用同样的方法推算 2013 年的冻雨落区(图 5)，2013 年的冻雨主要出现在湖南省南部，江西省中部和浙江省中部。湖南省和江西省的推算结果与气象站观测的雨凇分布基本是相符的，浙江省的气象站在冻雨期间未观测到雨凇现象。从推算的冻雨出现高度看，浙江省的冻雨也确实是出现在海拔 300 m 以上的山区。从冻雨出现次数看，这次冻雨过程中江西省中部和浙江省中部局部地区的冻雨次数最多，但宁波北仑附近山区的覆冰却是最重的。从电网反馈的灾情调查来看，宁波北仑地区冻雨持续时间确实只有2 d左右，但覆冰增长的速度非常

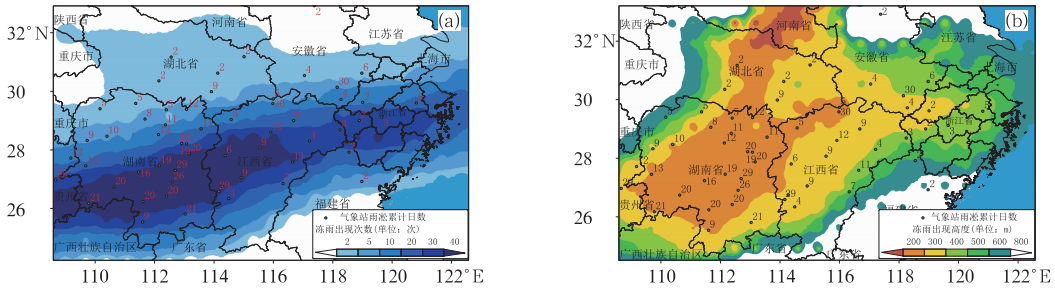

图 4 2008 年 1 月 11—31 日利用再分析资料推算的冻雨累计出现次数(a)及冻雨最低出现高度(b，单位：m)
(数字为各气象站雨凇出现累计日数)

Fig. 4 The accumulated frequency of freezing rain from 11 to 31 January 2008 (a) and the minimum occurrence altitude of freezing rain (b, unit: m) calculated from global reanalysis data
(Numbers are accumulative glaze days of observatories)

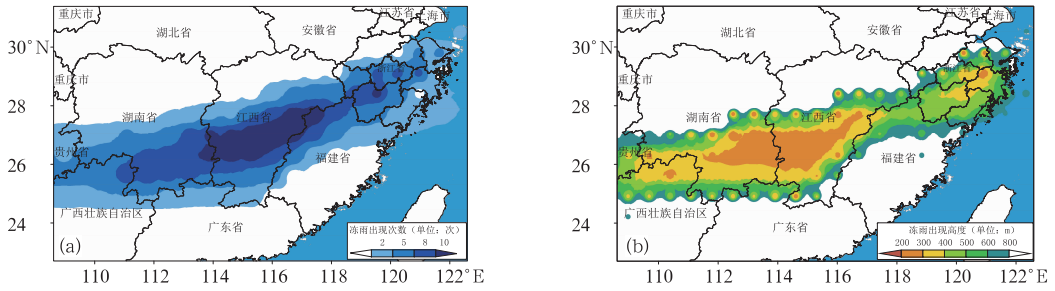

图 5 同图 4，但为 2013 年 1 月 3—8 日

Fig. 5 Same as Fig. 4, but from 3 to 8 January 2013

快。这与北仑山区所处的地理位置有关,北仑东北部是杭州湾入海口,地势平坦,冬季冷空气从东北方向吹来,没有遮挡,易在北仑山区出现持续东北大风,大风使过冷却雨滴加速在物体上冻结,导致北仑在短短 2 d 出现很厚的输电线路覆冰。北仑山区树木上也观测到有很长尾翼的雨凇,证明当时山区风速确实较大。

4　结论和讨论

通过以上对浙江冻雨的研究分析,得出如下结论:

(1) 研究发现浙江省强冻雨发生时具备冷暖冷的层结结构,且中间暖层气温>0℃,但相比湖南和江西,浙江省的暖层中心气温稍低,下层冷层厚度略厚,暖层中的液态水落到冷层后容易冻结,落到低海拔地面为冰粒,或者低海拔地面层气温高于 0℃,冻雨落到地面为降雨,所以冻雨期间浙江省绝大多数气象站(海拔在 200 m 以下)多观测到冰粒或降雨,雨凇现象比较少见。然而在海拔较高的山区,冷层厚度变薄,而且山区地面气温多低于 0℃,有利于冻雨落在山区地面形成雨凇,因此浙江省冻雨多出现在浙中海拔 400 m 以上和浙南海拔 600 m 以上的山区。

(2) 由于冻雨多出现在山区,而气象站往往设在海拔相对较低的市郊,因此,气象站对冻雨的观测一般来说总是低估的,浙江省就是典型的冻雨被低估的省份之一。本文采用全球再分析资料来推算冻雨落区,结果与浙江电网实际的覆冰灾情吻合得较好,可以为多山省(区、市)开展冻雨研究,或者进行冻雨监测和预报提供一条新的思路。

另外,浙江省与湖南省和江西省三省相连,三个省北面均地势平坦,冬季冷空气容易入侵,南面有高山屏障,冷空气南下受阻,同时该区域南方暖湿空气也十分活跃,冷暖气流势力相当,易长时间稳定在这一带,形成一条南方冻雨带,浙江位于这条冻雨带的尾部,属于受冻雨影响较多的省份之一。相比而言,在这条冻雨带上,湖南冻雨频数最多,江西次之,浙江最少。

参考文献

丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等,2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,66(5):808-825.

顾骏强,朱持则,姜瑜君,等,2010. 探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用[J]. 气象,36(8):81-86.

黄小玉,黎祖贤,李超,等,2008. 2008 年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J]. 气象,33(11):47-53.

黎惠金,李江南,林文实,等,2011. 2008 年初南方冻雨云物理过程的模拟研究[J]. 高原气象,30(4):942-950.

李登文,杨静,吴兴洋,2011. 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰气象条件分析[J]. 气象,37(2):161-169.

李庆峰,范峥,吴穹,等,2008. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术,32(9):33-36.

罗海波,李耀东,余政,等,2010. 2008 年初南方一次雨雪冰冻天气云微物理过程和逆温层结数值模拟[J]. 气象与减灾研究,33(1):16-22.

马晓刚,曲晓波,李月安,等,2010. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象,36(9):68-73.

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.

潘娅瑛,柳岳清,王亚云,2009. 2008 年初罕见的浙西南冻雨(雨凇)灾害分析[J]. 安徽农业科学,37(4):1731-1733.

漆梁波,2012. 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,38(7):769-778.

孙建华,赵思雄,2008. 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,13(4):368-384.

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):507-521.

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.

王亚非,李琰,李萍云,等,2008. 2008 年初中国南方雪灾大尺度环流背景分析[J]. 气象学报,66(5):826-835.

杨贵名,孔期,毛冬艳,等,2008. 2008 年初低温雨雪冰冻灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报,66(5):836-849.

宗志平,马杰,2011. 2008 年初冻雨强度变化以及与逆温层特征之间的关系[J]. 气象,37(2):156-160.

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.