

康丽莉,姜瑜君,邓芳萍,等,2021.中国南方地区冻雨落区分析及推算[J].气象,47(9):1122-1134. Kang L L, Jiang Y J, Deng F P, et al, 2021. Analyses and calculation of freezing rain falling zone in southern China[J]. Meteor Mon, 47(9):1122-1134 (in Chinese).

中国南方地区冻雨落区分析及推算*

康丽莉¹ 姜瑜君^{1*} 邓芳萍¹ 周象贤²

1 浙江省气象科学研究所,杭州 310008

2 国网浙江省电力公司电力科学研究院,杭州 310014

提 要: 基于改进的层结分析法,对 2008—2019 年我国出现的 5 次严重冻雨过程的冻雨落区及冻雨出现的海拔高度进行了推算,并利用全国地面 2000 多个地面测站的雨淞观测数据及电网覆冰灾情资料进行了验证。改进算法后推算的冻雨落区不仅涵盖了地面观测的雨淞分布区域,还涵盖了无雨淞观测但出现严重冻雨灾情的山区,且推算的冻雨出现海拔高度与实际灾情出现高度也较为一致,从而较好地解释了复杂地形条件下出现明显冻雨灾情而未见地面雨淞观测记录的现象。推算获取的 5 次冻雨落区叠加后表明:中国南方地区存在一条从贵州、湖南、江西到浙江,自西向东、冻雨频次由高到低的冻雨带。该冻雨带往北可发展到达四川、重庆、湖北、安徽南部,往南则可抵达云南、广西、广东和福建北部,其南部分布边缘与我国南方山脉走向较为一致。冻雨区域上空普遍存在“冷-暖-冷”的层结特征,而在浙江省,广西、广东和福建三省(自治区)的北部等地地形起伏度较大的地区,则具有“暖-冷-暖-冷”的层结特点,即近地面存在气温高于 0℃ 的浅薄暖层。因而,浙江省和福建北部的冻雨主要出现在海拔高度为 300~400 m 以上的山区,广西东北部和广东西北部还受深厚暖层影响,冻雨多出现在海拔高度为 300~1300 m 的山腰区域。

关键词: 冻雨,雨淞,冻雨落区,温度层结,冷暖层厚度

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.09.008

Analyses and Calculation of Freezing Rain Falling Zone in Southern China

KANG Lili¹ JIANG Yujun¹ DENG Fangping¹ ZHOU Xiangxian²

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

2 State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014

Abstract: Based on the improved stratification analysis method, the freezing rain fall zones and the altitudes of five severe freezing rain processes that occurred in China during 2008—2019 are calculated, and the result is verified by using the glaze data observed at 2 000 stations and the ice disaster data of power grid. The calculated freezing rain fall zones cover both the areas with glaze and the areas with severe freezing rain disaster. The calculated altitudes of freezing rain occurrence are also consistent with the altitudes of ice disasters. The calculated results can well explain the phenomenon that there is freezing rain disaster but no glaze records under complex terrain conditions. The five calculated freezing rain fall zones are superimposed, showing that there is a freezing rain belt from Guizhou, Hunan, Jiangxi to Zhejiang, with the day number of freezing rain from high to low. The freezing rain belt can develop northward to Sichuan, Chongqing, Hubei and southern Anhui, and southward to Yunnan, Guangxi, Guangdong and northern Fujian. There is a typical cold—warm—cold stratification above the freezing rain zone. However, there is

* 国家重点研发计划(2018YFC1507802)和国网浙江省电力有限公司科技项目(5211DS18002P)共同资助

2020 年 6 月 1 日收稿; 2021 年 7 月 14 日收修定稿

作者简介:康丽莉,主要从事应用气象研究. E-mail:jennykll@163.com

通讯作者:姜瑜君,主要从事电力气象灾害分析技术研究. E-mail:6368292@qq.com

a warm—cold—warm—cold stratification above the freezing rain zone in greatly undulate terrain, such as Zhejiang and the north of Guangxi, Guangdong and Fujian, that is, there is a shallow warm layer with temperature higher than 0°C near the surface. Therefore, the freezing rain usually occurs in the mountainous areas with an altitude above 300—400 m in Zhejiang and northern Fujian. The northeast of Guangxi and the northwest of Guangdong are also affected by the deep warm layer, and the freezing rain mostly occurs in the hillside areas with an altitude of 300—1300 m.

Key words: freezing rain, glaze, freezing rain zone, temperature stratification, thickness of cold and warm layer

引言

2008年我国南方地区出现的大范围冰冻雨雪天气引起社会的极大关注,许多学者从多个角度对这次冻雨过程进行了全面分析,得出了很多有意义的研究结论(丁一汇等,2008;黎惠金等,2011)。由于常规气象观测中冻雨是用地面气象站观测的雨淞记录来判识的,因此,国内现有关于冻雨落区的研究结论均基于气象站观测的雨淞数据,即只有在气象站观测到雨淞才能确定该区域出现了冻雨(宗志平等,2013;索渺清等,2018;汪卫平等,2020)。然而有些地区的地面气象站在冬季常常观测不到雨淞,但附近海拔较高的山区往往能出现雨淞天气现象。例如,2008年1月浙江省只有个别气象站有少量雨淞现象记录,但据浙江省电网覆冰灾情调查统计表明,1月27日至2月1日期间,出现了全省范围的严重输电线路雨淞覆冰灾情,线路杆塔事故点主要分布在海拔高度为400~800 m的山区(顾骏强等,2010)。可见,仅仅利用地面气象站的雨淞观测记录分析冻雨落区,在地形起伏度较大的地区,可能出现冻雨落区范围被严重低估的情况。

许爱华等(2011)分析江西的冻雨气候特征后发现,山区出现冻雨的概率明显高于其他地区,这一现象也在安徽南部(王传辉等,2020)、广西东北部(唐熠等,2011)、广东西北部(毛先胤等,2012)的观测事实中被证实。虽然这些研究中提到冻雨多发生在山区的事实,但均未进行深入的成因分析及机理探讨,因为目前只能在常规地面气象站开展雨淞观测,还无法实现对山区冻雨的有效自动观测。冻雨之所以被关注,主要在于其导致的覆冰灾害。强冻雨过程所致的雨淞覆冰会对交通、输电线路、通讯线路、林业和农业等造成较大的影响,也因而有较多的灾情

调查资料。冻雨灾情资料反映了冻雨的分布和强度,可以作为地面观测站雨淞数据的补充,尤其是山区的冻雨灾情资料,可以填补山区冻雨观测资料的空白。冻雨灾情中,输电线路覆冰灾情最有使用价值(杨靖波等,2008;李庆峰等,2008),一是因为电网规模增长迅速,覆盖面比较广;二是由于用地紧张等因素,输电走廊多选择在山区,正好是冻雨多发的区域;三是冻雨对电网影响很大,电力公司非常重视,灾情记录比较详细。从目前冻雨影响的文献记载来看,冻雨对输电线路的影响分析也是最多的。如:黄子平等(2005)指出2005年华中电网冰闪事故中输电线路覆冰超过50 mm;王凌等(2008)评估2008年冻雨灾害对我国南方电力运行造成的灾难性影响;胡艳楠等(2017)在2009—2013年华中电网线路覆冰在线观测系统对湖北省500 kV高压输电线路的实时观测中发现,2010年2月、2011年1月、2012年1月和12月都观测到了线路积冰。所以,利用输电线路覆冰灾情记录作为地面气象站观测的雨淞数据的补充来确定冻雨落区是比较可行的。

数量丰富且较为准确的冻雨灾情数据,可以被应用于构建合适的冻雨落区判识模型。目前的大多数研究较为一致地认为冻雨与逆温层有很好的相关性。如:宗志平和马杰(2011)指出逆温层强度与冻雨强度变化之间存在明显关系;陶玥等(2012)揭示了逆温区范围和冻雨落区的差异,并把冻雨的形成条件总结为:高层存在冻结层,中低层存在一个融化层(温度高于0°C)和一个贴近地面的冷冻层(温度低于0°C),即出现冻雨的区域上空有明显“冷—暖—冷”的层结特征;孙建华和赵思雄(2008)研究指出,最有利于冻雨产生的层结条件应当有中层冻结层、暖层、逆温层,且这些层结的强度和厚度要适当,最有利于冻雨出现的地面温度在-3~-1°C;罗海波等(2010)强调除了有利的层结条件,还需具备地面

在 0°C 以下的条件和少量的降水;马晓刚等(2010)提出的冻雨落区概念模型中也是利用冻雨的层结特点,结合地面 0°C 线作为判断条件之一。可见,利用“冷-暖-冷”的层结特点判断冻雨落区是诸多研究的共识,有些还附加了地面有少量降水和地面气温在 0°C 以下的判识条件。但在实际分析中发现,冻雨期间的降水会直接冻结在雨量桶上而不能及时体现在降水量的实时监测数据上,因此考虑地面降水可能会造成冻雨漏报;而以地面气象站气温在 0°C 以下为条件也会遗漏只出现在海拔较高地区的冻雨。因此,本文认为在冻雨判识时仅用层结分析法更为合适。康丽莉等(2017)基于欧洲中心的全球再分析资料 ERA-Interim($0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$),采用每个格点向上计算层结的方法推算出浙江省 2008 年的冻雨落区和出现高度,合理地解释了出现在较高海拔区域的输电线路雨淞覆冰,但是未对冻雨多发的贵州、湖南等地的冻雨进行推算和分析,且研究的冻雨个例也偏少。本文将针对我国 34°N 以南的地区 2008 年以来的几次严重冻雨过程,首先采用地面测站的雨淞数据,结合输电线路覆冰灾情资料分析冻雨落区。然后,基于欧洲中心的全球再分析资料 ERA-Interim($0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$),采用“冷-暖-冷”层结判断的推算方法进行冻雨落区推算,并利用前面分析得到的冻雨落区对推算结果进行验证。最后,给出我国南方地区冻雨分布的空间分布特点。

1 资料和方法

1.1 资 料

本文用到的资料有:(1)全国 2000 多个地面气象站 2008—2019 年的雨淞日数。将日雨淞站数超过 100 站且持续 3 d 及以上的冻雨过程作为一次强冻雨过程。2008 年从 1 月 10 日至 2 月 2 日出现了 4 次强冻雨过程(孙建华和赵思雄,2008),选择第三次最为严重的过程作为分析对象。随后选择了 2011 年 1 月 2—6 日、2013 年 1 月 3—7 日、2018 年 1 月 25—27 日以及 2019 年 2 月 9—11 日。(2)为了进行冻雨落区推算,本文匹配了强冻雨个例同期的欧洲中心的全球再分析资料 ERA-Interim($0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$),垂直分层有 37 层,每日有 4 次数据(00、

06、12 和 18 时;世界时,下同)。(3)收集了强冻雨个例期间的各类覆冰灾情数据,包括文献记载的各省输电线路覆冰灾情,以及电网系统统计的覆冰灾情资料等。

1.2 冻雨推算方法

冻雨落区推算的思路为:分析逐时逐格点温度层结情况,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,再分析资料逐日 4 次数据中有一次满足冻雨出现的条件就将之判识为冻雨日。具体的推算方法是,每个格点从最底层开始垂直向上计算是否满足“冷-暖-冷”层结,并对中间暖层和底层冷层厚度设定一定的阈值。由图 1 可知,5 次冻雨过程上空均对应有“冷-暖-冷”的层结结构,但是中间暖层高度差异较大,如 2008 年冻雨过程的中间暖层在 700 hPa 左右(图 1b),2011 年(图 1c)、2018 年(图 1e)和 2019 年(图 1f)冻雨过程的中间暖层在 750 hPa 左右,而 2013 年冻雨过程的中间暖层在 850 hPa 左右(图 1d)。因此,业务中不宜简单地采用 850 hPa 和 700 hPa 两层的 0°C 等温线判断冻雨落区。5 次冻雨过程中,2008 年的冻雨过程具有非常典型的“冷-暖-冷”的层结特点(图 1a),底层冷层厚度在 500~3000 m,中间暖层厚度大致在 500~3600 m。其他 4 次冻雨过程的底层冷层厚度和中间暖层厚度均比 2008 年的浅薄。因此这里以 2008 年个例来确定的阈值区间,也可以满足其他 4 次冻雨过程。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。因此本研究中底层冷层厚度最低取 400 m,冷层厚度上限取 3000 m;中间暖层厚度也取大于 400 m,暖层厚度上限取 3600 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。从图 1d 和 1f 也可以看出,2013 年和 2019 年的 2 次冻雨过程近地面层气温在 0°C 以上,而往上几百米则出现低于 0°C 的冷层,形成“暖-冷-暖-冷”的层结特点,在该层结特点背景下,出现地面台站未观测到雨淞而山区出现覆冰灾情的情况。在这里,本文将底层冷层出现的底部高度,作为冻雨出现的最低海拔高度。

另外,黄山、庐山、南岳、峨眉山,以及贵州一些海拔高度在 1000 m 以上的高山气象站,每年都有

较多的雨淞日数。李登文等(2009)利用威宁和贵阳两站的多年探空观测记录分析发现贵州西部高海拔地区以没有融化层的“单层结构”为主,其他大部分地区则为“两层结构”。这说明海拔高度在 1 000 m 以上的高山气象站与一般的低海拔气象站雨淞的形成过程有很大区别(张昕等,2015)。鉴于华南地区较低海拔区域经济活动更多,受冻雨天气影响更大,

为获取我国 34°N 以南区域大范围冻雨落区特征,本文重点关注海拔高度 1 000 m 以下的冻雨,采用典型的“冷-暖-冷”层结进行推算,在实际处理过程中去掉底层冷层出现高度大于 1 000 m 的格点,同时也剔除地面气象站海拔高度高于 1 000 m 的站点的雨淞数据。

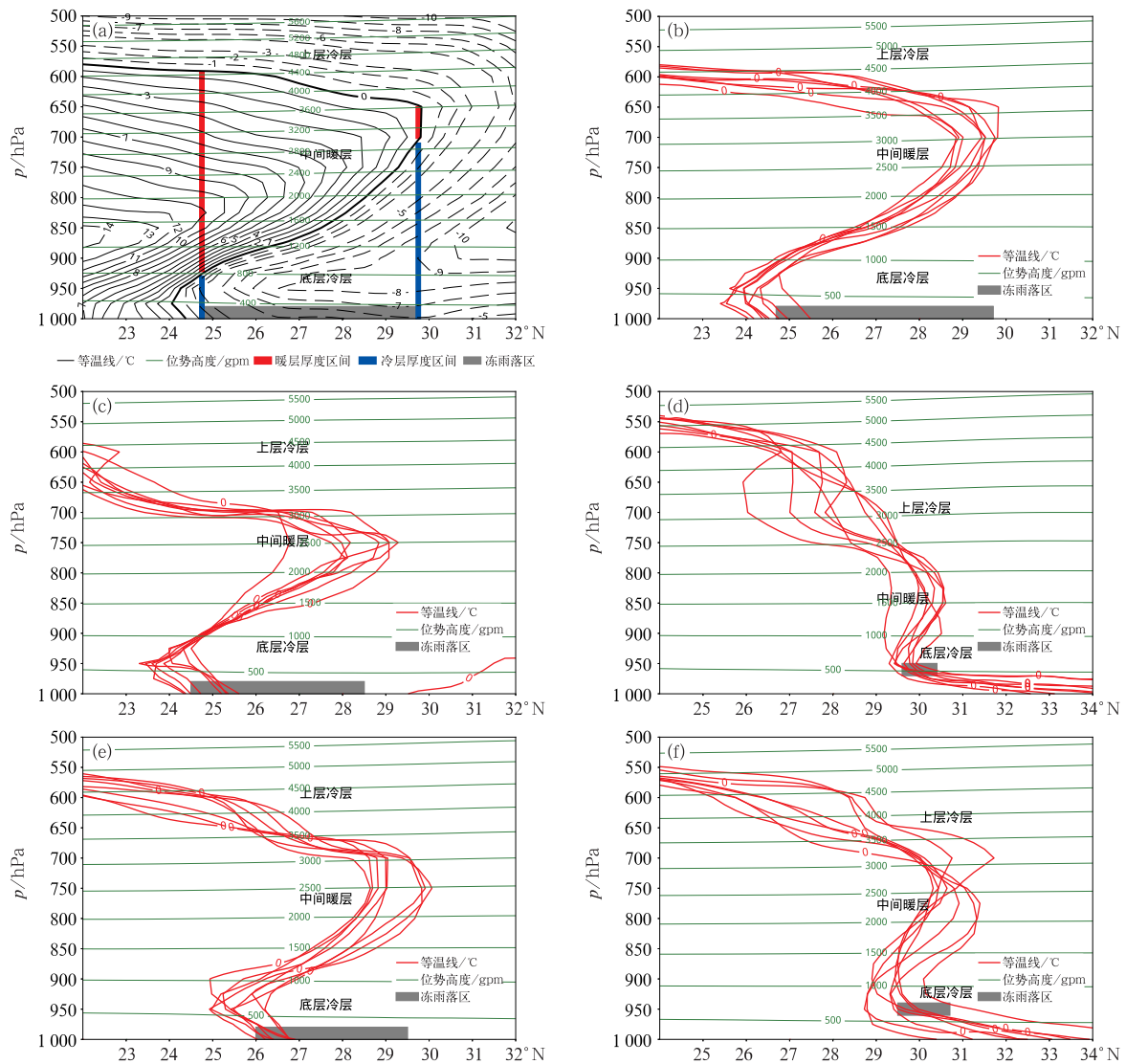


图 1 基于再分析资料的(a)2008 年 1 月 27 日 18 时沿 113°E 的温度层结分布, (b)2008 年 1 月 26—27 日沿 113°E、(c)2011 年 1 月 2—4 日沿 111°E、(d)2013 年 1 月 6—7 日沿 122°E、(e)2018 年 1 月 26—27 日沿 115°E 和(f)2019 年 2 月 10—11 日沿 120°E 的 0°C 等温线剖面

Fig. 1 The stratification structure profile at 1800 UTC 27 January 2008 along 113°E (a), and the vertical cross profiles of the 0°C isothermal line during 26—27 January 2008 along 113°E (b), 2—4 January 2011 along 111°E (c), 6—7 January 2013 along 122°E (d), 26—27 January 2018 along 115°E (e), and 10—11 February 2019 along 120°E (f) based on global reanalysis data

2 基于观测的南方地区冻雨落区分析

2.1 2008 年冻雨落区分析

2008 年 1 月 10 日至 2 月 2 日共出现了 4 次强冻雨过程。其中,1 月 25—29 日的冻雨过程是最强的 1 次,期间气象站观测的雨淞分布如图 2 所示,贵州、湖南、江西、湖北和安徽南部,观测到雨淞天气的站数较多,且大部分测站观测到 4~5 d 的雨淞天气,体现出此次冻雨过程之强、影响之广,实属罕见。图 2 中也可以看到,浙江省气象站观测到的雨淞天气相对较少,而且集中在浙北区域。然而,从此次冻雨期间浙江电网覆冰的倒塔点分析,浙江省大部分地区都出现了电网覆冰倒塔的事故,尤其在浙江省中部分布最多,一直延伸到近海区域。图 3 中浙江电网覆冰倒塔点的海拔高度集中在 400~700 m,而浙江省 90% 以上的气象站海拔高度在 200 m 以下,因此事故点邻近的地面气象站也未获取相应程度的冻雨观测结果,所以在分析冻雨落区时电网覆冰灾情即成为重要的补充材料。此外,在没有雨淞地面观测数据的广东北部(刘平原等,2010)、闽西北山区

(林敏,2009)均在高海拔山区出现了严重的冻雨覆冰灾害。总的来说,2008 年 1 月 25—29 日,强冻雨实际落区范围应包括:贵州、湖南、江西、浙江大部,重庆、湖北、安徽的南部,广西、广东和福建北部,以及其他一些省份的局部区域。

2.2 强冻雨两个例实际落区分析

表 1 为 2008—2019 年 5 次强冻雨过程期间观测的雨淞分布情况和同期电网覆冰灾情的补充资料。2008 年的电网覆冰灾情补充资料表明,在雨淞出现日数较少的浙江省大部、福建省西北部和广东省北部也出现严重的电网覆冰。2011 年的电网覆冰灾情补充资料显示,广西出现雨淞的站数较少,但覆冰灾情较严重。2013 年 1 月 3—8 日,浙江省地面气象站未观测到雨淞,但在局部山区出现严重冻雨灾情,其中,宁波北仑地区输电线路覆冰厚度达 20~30 mm。2018 年 1 月江西出现雨淞的站数也较少,但电网覆冰灾情显示江西省海拔高度 300 m 以上的山区出现较大范围的覆冰过载事故,严重程度仅次于 2008 年。2019 年观测到的雨淞站数较少,但在湖北、安徽和浙江的高海拔山区出现 20 mm 以上的电网覆冰。

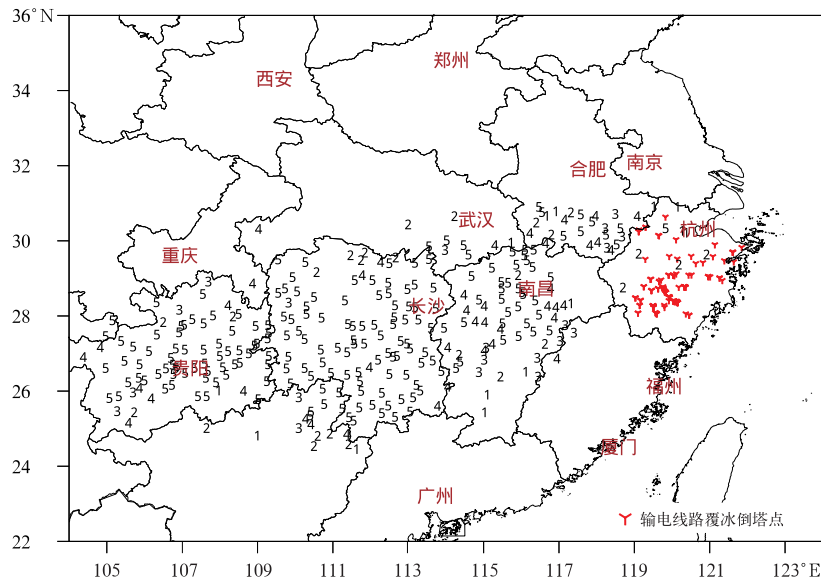


图 2 2008 年 1 月 25—29 日地面气象站雨淞累计日数
(数字为日数,单位:d;红色 γ 为浙江省输电线路覆冰倒塔点)

Fig. 2 The accumulative glaze days at ground meteorological stations from 25 to 29 January 2008
(Numbers are glaze days, unit: d, the red γ is the point of the iced and toppled transmission line tower in Zhejiang Province)

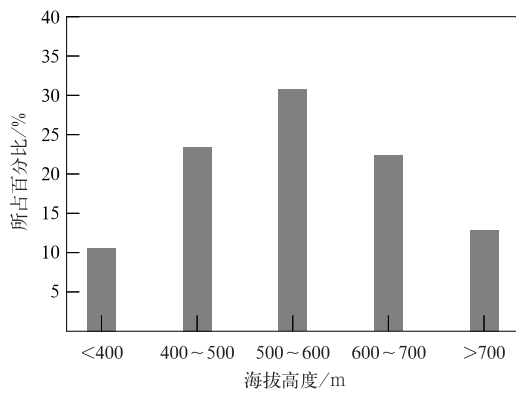


图 3 2008 年初浙江省输电线路倒塔点的海拔高度分布

Fig. 3 The altitude distribution of the iced and toppled transmission line tower in Zhejiang Province in early 2008

从分析的 5 次冻雨过程的落区来看,2008 年 1 月 25—29 日是冻雨最严重的一次过程,其后的几次冻雨出现范围大致在 2008 年冻雨落区的范围之内。2008 年整个冻雨区都出现了严重的冻雨覆冰,但后面的几次强冻雨过程,只在部分冻雨区出现严重的冻雨覆冰。

3 我国南方冻雨落区的推算

3.1 冷层和暖层厚度取值

底层冷层厚度和中间暖层厚度的阈值取值,对冻雨落区推算是有直接影响的,本文选择最为典型的 2008 年 1 月 25—29 日的冻雨过程进行试验。当底层冷层厚度取 400~3 000 m、中间暖层厚度取

表 1 2008—2019 年 5 次强冻雨过程的雨凇分布及电网灾情补充资料

Table 1 Distribution of glaze days at observatories and ice disaster data of power grid during the five heavy freezing rain cases from 2008 to 2019

序号	发生时间/年.月.日	气象站观测的雨凇分布	同期电网覆冰灾情补充资料
1	2008.1.25—29	主要分布在贵州、湖南、江西全境,广西、福建北部,湖北、安徽南部和浙江局部区域	广东(刘平原等,2010)北部,海拔高度 500 m 以上的山区出现严重的电网覆冰灾害;闽西北山区在 1 月下旬也出现了严重的冻雨覆冰灾害(林敏,2009);浙江省中北部出现大范围的输电线路覆冰倒塌事故(顾骏强等,2010)
2	2011.1.2—6	主要分布在贵州和湖南全境,重庆东南部	广西北部的资源、全州、兴安、灌阳和南丹等五县电线结冰直径达 27~44 mm(刘晓梅等,2013)
3	2013.1.3—8	主要分布在贵州东部,湖南和江西中南部,以及广西东北部	浙江省宁波、台州、丽水、金华四个地区出现明显的输电线路覆冰,其中宁波电网受灾最严重,覆冰厚度达 20~30 mm(康丽莉等,2016)
4	2018.1.25—27	主要分布在贵州东部,湖南,江西中北部,湖北和安徽南部,以及广西东北部	江西 40 站出现电线结冰,最大电线结冰直径达 65 mm(含导线直径)(陈新玉等,2018);江西电网出现覆冰严重超过覆冰荷载而导致的地线断线和塔头折损的事故,主要发生在海拔高度超过 300 m 的山区;24—27 日,安徽省沿长江一带共有 20 多条 220 kV 及以上输电线路出现舞动,观测到最大覆冰厚度为 12.3 mm(王传辉等,2019)
5	2019.2.9—11	出现雨凇的站数较少,主要分布在贵州东部,湖南中北部,湖北和安徽南部	2 月 9—13 日安徽沿江及皖南山区出现冻雨过程,25 条线路覆冰严重;浙江省湖州莫干山输电线路出现覆冰灾情,覆冰厚度达 24 mm(浙江省电力公司灾情统计)

400~3 600 m 时,分析结果表明北部冻雨范围略偏小,而南部冻雨范围略偏大,其余部分与冻雨落区吻合得较好。之后,再对冷层和暖层厚度阈值取值调整也未见改善(图 4a)。刘朝茹等(2015)、欧建军等(2011)、余金龙等(2017)分析冻雨的层结特点时,指出存在两种逆温层结构,一是有暖层(即“冷-暖-冷”层结),二是无暖层(存在逆温层结构,但中间暖层气温小于 0℃ 的情况)。层结结构中有无暖层是根据每日两个时次的探空资料判断的,因此不可避免地会存在每日两个时次的探空资料中无大于 0℃ 暖

层,但在两个时次的间隔期间有可能出现大于 0℃ 暖层的情形。本文采用的再分析资料也是每日只有四个时次的的数据,同样存在类似的情况。因此,在实际操作中把中间暖层的最低温度取为-1.0℃,可以较好地考虑四个时次间隔期间可能出现大于 0℃ 暖层的情形,推算结果最佳(篇幅限制,具体结果未列出)。另外,图 1 中 25°N 以南的底层冷层较薄,在 500~1 000 m;而其上的暖层深厚,且暖层中心最高气温可达 7~10℃,导致从暖层下落到浅薄冷层的雨滴未能成为过冷雨滴,落到地面不能形成雨凇。

所以在冻雨落区判识中将暖层温度高于 7°C 且底层冷层厚度低于 1000 m 的格点判识为非冻雨格点。经过上述两个改进后,推算获取的冻雨落区(图 4b)显示北部冻雨和南部冻雨范围都有明显改进,与实际情况更为吻合。推算的落区不仅覆盖了地面观测多雨淞的站点,也涵盖了地面气象站无雨淞观测但出现严重覆冰的区域,推算效果较好,可以用于日常气象业务的冻雨落区分析。

3.2 冻雨落区推算结果分析

图 4b 为利用再分析资料推算的 2008 年 1 月 25—29 日的冻雨出现日数,其推算结果与罗海波等(2010)的结论基本一致,贵州、湖南、江西中南部地区出现 5 d 的冻雨,浙江中部也有 5 d,推算结果与冻雨实际落区是吻合的。图 5 是推算的该时段冻雨出现的最低海拔高度。湖南大部、江西北部、湖北、

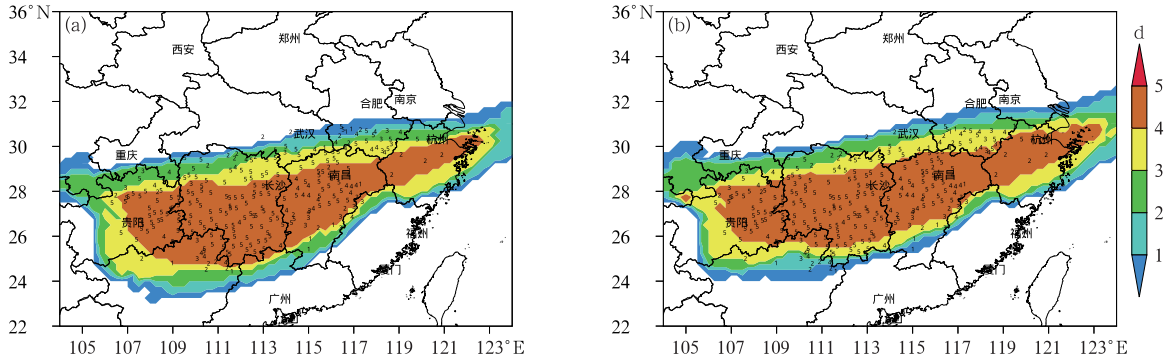


图 4 2008 年 1 月 25—29 日推算的冻雨累计日数(填色)
(a)推算方法改进前,(b)推算方法改进后
(黑色数字为同期气象站累计冻雨日数,单位:d;下同)

Fig. 4 The calculated accumulative days of freezing rain from 25 to 29 January 2008 (colored)
(a) before the improvement of calculation method, (b) after the improvement of calculation method
(Numbers are accumulative glaze days at observatories in the same period, unit: d; the same below)

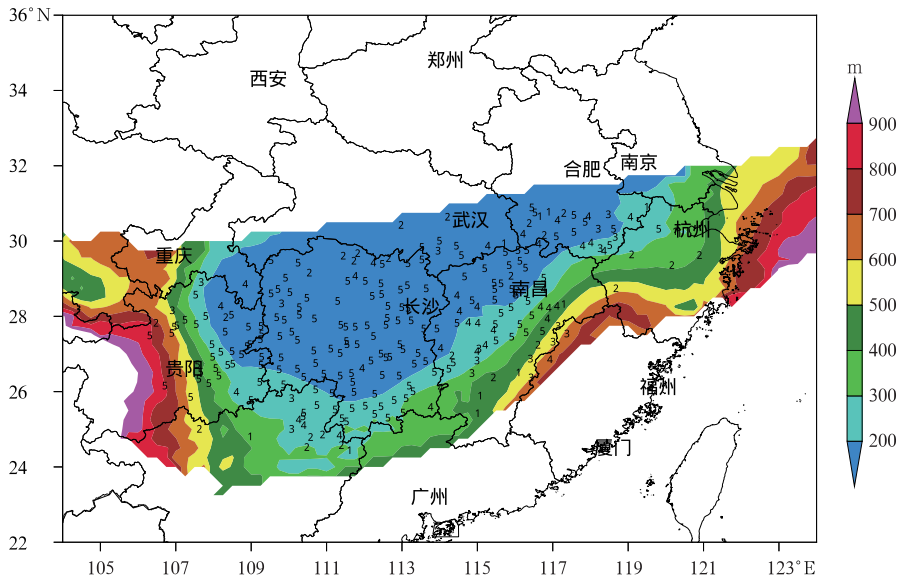


图 5 利用再分析资料推算的 2008 年 1 月 25—29 日冻雨最低出现高度(填色)
Fig. 5 The minimum occurrence altitude of freezing rain from 25 to 29 January 2008
calculated by using global reanalysis data (colored)

安徽,冻雨出现的海拔高度最低,在 200 m 以下。这些地区是观测到雨淞日数站点最密的地区,各观测站观测到的雨淞日数也最多,说明运用该方法获取的冻雨落区分布可以从地面观测站的雨淞数据得到很好的辅助证明。广西、广东、福建三省(自治区)的北部和浙江省全省,冻雨出现的海拔高度较高,基本在 300 m 以上,与之匹配的地面观测站雨淞日数相对较少,但高海拔山区出现的严重的冻雨灾情结合事故发生地海拔高度,很好地解释了地形起伏度较大的区域,低海拔地面测站无法获取冻雨观测数据,但附近山区却实际存在冻雨现象的事实。

利用同样的方法推算出另外 4 次冻雨过程的落区。2011 年地面观测雨淞主要分布在贵州和湖南地区,推算结果显示(图 6a)湖南和贵州确实出现了严重的冻雨,冻雨频次很高。与地面测站的雨淞分布不同的是,推算结果中江西和浙江也出现了较多的冻雨日数。从冻雨出现的海拔高度来看(图 6b),江西和浙江冻雨出现的海拔高度较高,基本在海拔

400 m 以上。江西和浙江的冻雨与湖南和贵州相比,冻雨日数少且出现海拔较高,所以这次冻雨在湖南和贵州造成严重的影响,对江西和浙江的影响较小。

2013 年 1 月 3—7 日,在贵州、湖南和江西观测到较多的雨淞日数,但从推算的冻雨范围和日数来看(图 7a),不仅涵盖了有雨淞的区域,还包括了没有观测到雨淞的浙江省。此次冻雨过程中心的雨淞日数虽然也达到了 5 d,但该区域实际的电网覆冰灾情并不严重,如浙江省中部的金华、绍兴山区出现了 10 mm 左右的输电线路覆冰。然而,在推算的冻雨日数只有 3 d 的宁波北仑却有 10 多条输电线路出现厚度 30 mm 以上的严重覆冰,分布在海拔高度 300~400 m 以上的山区(图 7b)。由此可见,冻雨持续日数与冻雨强弱并不完全一致,持续 2~3 d 的强冻雨也可以造成严重的雨淞覆冰,需要对这种强冻雨进一步开展专门的研究。

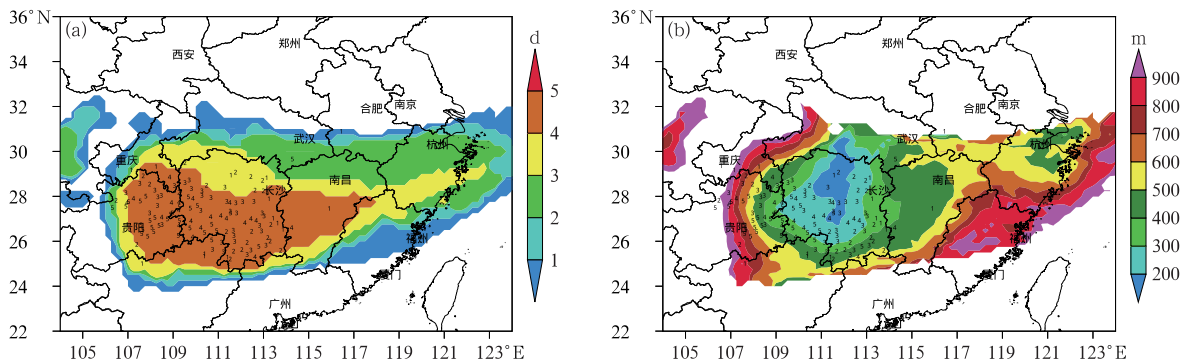


图 6 利用再分析资料推算的 2011 年 1 月 2—6 日的冻雨累计日数(a, 填色)和冻雨最低出现高度(b, 填色)
 Fig. 6 The accumulative days of freezing rain (a, colored) and the minimum occurrence altitude of freezing rain (b, colored) from 2 to 6 January 2011 calculated by using global reanalysis data

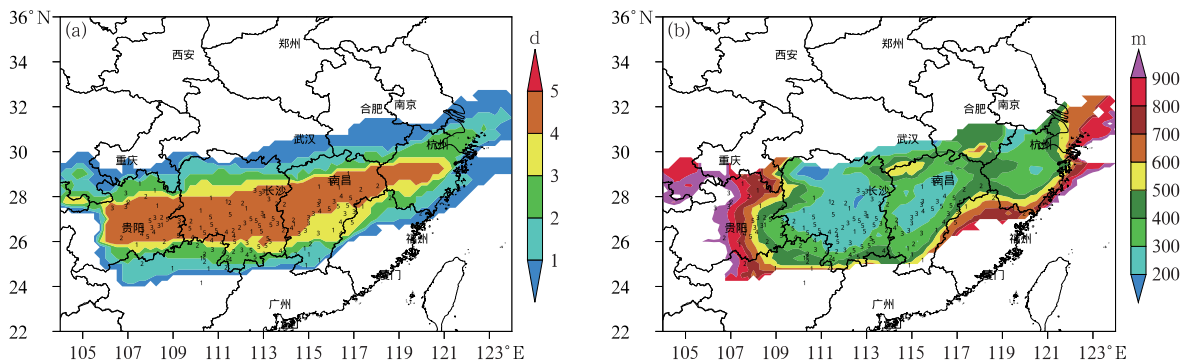


图 7 同图 6, 但为 2013 年 1 月 3—7 日
 Fig. 7 Same as Fig. 6, but from 3 to 7 January 2013

在 2018 年的冻雨过程中,江西省电网覆冰统计资料显示:江西电网在 300 m 的山区出现严重的输电线路覆冰灾情,上百条输电线路出现雨淞覆冰,最大覆冰厚度达 40~50 mm。而地面气象站观测的雨淞主要分布在贵州、湖南、江西北部,以及湖北南部和安徽南部。推算的冻雨分布则包含了江西省大部分区域(图 8a),与江西电网的覆冰灾情更为符合。从覆冰出现的海拔高度(图 8b)来看,江西中南部区域冻雨出现的海拔高度在 300 m 以上,也与电网覆冰的实际海拔高度吻合。因此,运用本文方法推算的冻雨落区分布一方面可以辅助地面观测,提供更加精细化的冻雨空间分布特征情况;另一方面可以体现出冻雨现象出现的海拔高度差异,更好地描述复杂地形条件下冻雨的实际分布。

2019 年 2 月这次冻雨过程,观测的雨淞的站数较少,主要出现在湖南中北部、湖北和安徽南部。浙江省没有雨淞数据,但在浙江中部出现了较明显的电网覆冰,甚至在湖州德清海拔高度 500 m 以上的莫干山还出现了输电线路覆冰致倒塔的事故,观测的覆冰厚度达 24 mm。推算的冻雨范围包括了观

测到雨淞的站点,也包括了出现覆冰事故的浙江中北部(图 9a)。可见推算的结果也很符合实际的冻雨分布。图 9b 显示的冻雨出现高度表明,浙江省冻雨出现的海拔较高,与湖州德清地区发生实际灾情的海拔高度是一致的。总的来说,这次过程的冻雨落区推算结果与地面资料分析的冻雨落区吻合较好,还能比较准确地描述冻雨出现的海拔高度。

4 冻雨的空间分布特点

4.1 冻雨水平分布特点

本文将 5 次强冻雨过程推算的冻雨日数进行逐格点的累加,分析南方地区冻雨落区的水平分布特点。宗志平等(2013)通过分析 1978—2008 年 62 次低温雨雪冰冻过程事件得出,冻雨主要分布在贵州、湖南、江西、湖北和河南等省份。而本文补充输电线路覆冰灾情补充资料后,认为中国南方地区存在一条从贵州、湖南、江西到浙江的冻雨带。由再分析资料推算的 5 次强冻雨累加后的分布来看(图 10),中

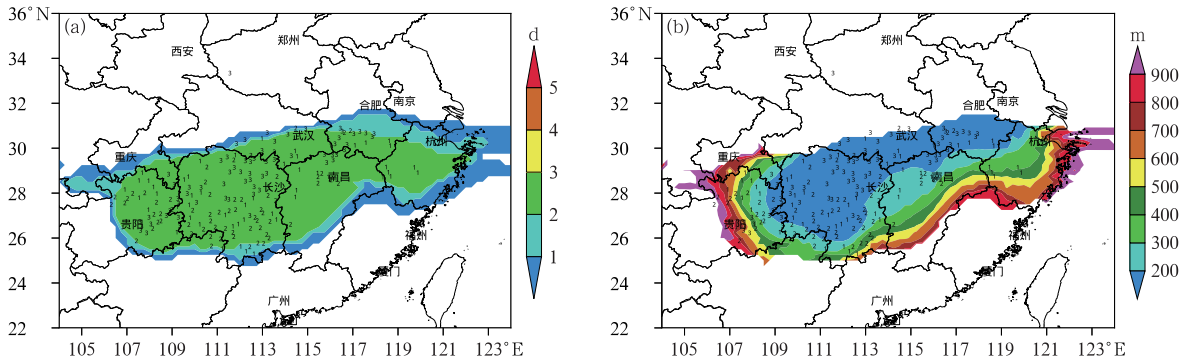


图 8 同图 6, 但为 2018 年 1 月 25—27 日

Fig. 8 Same as Fig. 6, but from 25 to 27 January 2018

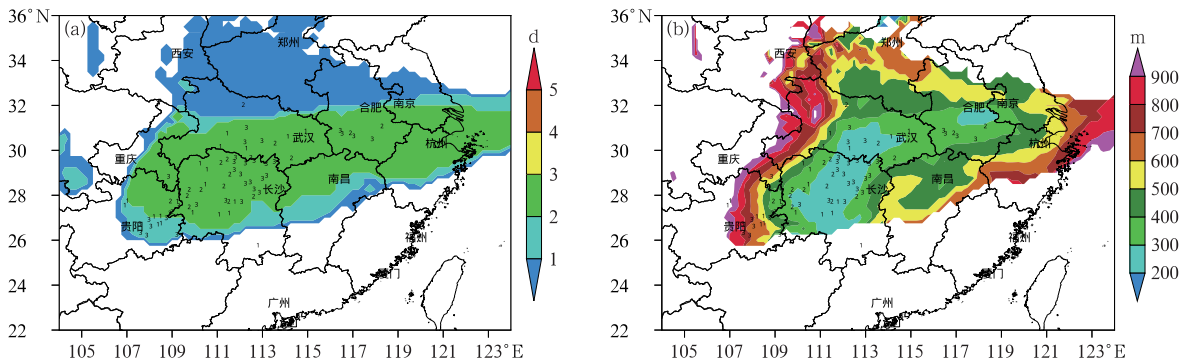


图 9 同图 6, 但为 2019 年 2 月 9—11 日

Fig. 9 Same as Fig. 6, but from 9 to 11 February 2019

国南方地区确实存在一条从贵州、湖南、江西到浙江的冻雨带,其中贵州最严重,湖南次之,江西和浙江略轻。但相比其他省份,这四个省份的冻雨最为严重,有些年份可能会往北扩展到四川、重庆、湖北、安徽南部;有些年份会往南扩展到云南、广西、广东、福建北部。其中,位于东南沿海的浙江省,广东北部,福建北部等东南丘陵地带,由于其地形起伏度较大,且在冻雨期间低海拔地面站气温往往略高于 0°C 而观测不到雨淞天气,但在海拔较高的山区常常出现冻雨灾情。

4.2 冻雨垂直分布特点

前面的分析表明,冻雨在某些区域多出现在海拔较高的地区,而在另一些区域,冻雨出现的海拔高度变化很大。这里以 2008 年第三次最强的冻雨过程为例,分别沿 113°E、116°E、120°E 三个经度绘制 0°C 等温线的垂直剖面图,分析不同经度冻雨的垂直分布特点(图 11)。图中红线为沿 113°E 经过长沙附近的 0°C 等温线的垂直分布,蓝线为沿 116°E 经过南昌附近的 0°C 等温线的垂直分布,绿线为沿 120°E 经过杭州附近的 0°C 等温线的垂直分布。可以看到,三个经度的 0°C 等温线垂直分布最大的不同,在于向南发展的程度不同。沿 120°E 的冻雨受到浙南到闽北高山的阻挡,只到达 27°N 的福建北部。沿 116°E 的冻雨可以向南发展到 25°N,因为冬

季冷空气从江西北部平原灌入后,一直向南发展,直到受到江西南部 and 广东北部交界区域的山脉阻挡,才停滞在 25°N 以北区域。沿 113°E 的冻雨可以发展到更南的 24°N,主要是因为湖南省北部是平坦的洞庭湖平原,冬季冷空气大举进入湖南并南下,一直影响到湖南、广西和广东交界区域,导致广西和广东北部出现冻雨覆冰灾情。

沿 120°E 的 0°C 等温线表明,27°~30°N 的地面层气温在 0°C 以上,而海拔高度 400~1 800 m 左右的山区气温低于 0°C,符合“暖-冷-暖-冷”层结分布,说明该区域冻雨主要出现在海拔高度 400 m 以上的山区(图 11 中绿色双箭头),随着冷暖空气的强弱变化,有些年份出现的海拔高度高一些,有些年份出现的海拔高度低一些,这一现象与浙江省和福建北部的冻雨特点吻合。沿 116°E 的 0°C 等温线表明,25°~27°N 也符合“暖-冷-暖-冷”层结分布,与浙江省的冻雨特点相似;27°N 以北的江西中北部、湖北南部和安徽南部则易在低海拔区域出现雨淞(图 11 中蓝色双箭头)。沿 113°E 的剖面中,24°~25°N 亦符合“暖-冷-暖-冷”层结分布,但其中间暖层更为深厚,25°N 以南区域冷空气基本被压缩在海拔高度 1300 m 以下,1300 m 以上受暖湿气流影响,气温高于 0°C。因此该区域冻雨主要出现在海拔高度 300~1300 m 范围内(图 11 中红色双箭头)。周绍毅等(2010)在分析广西导线覆冰特征时发现,桂北东部

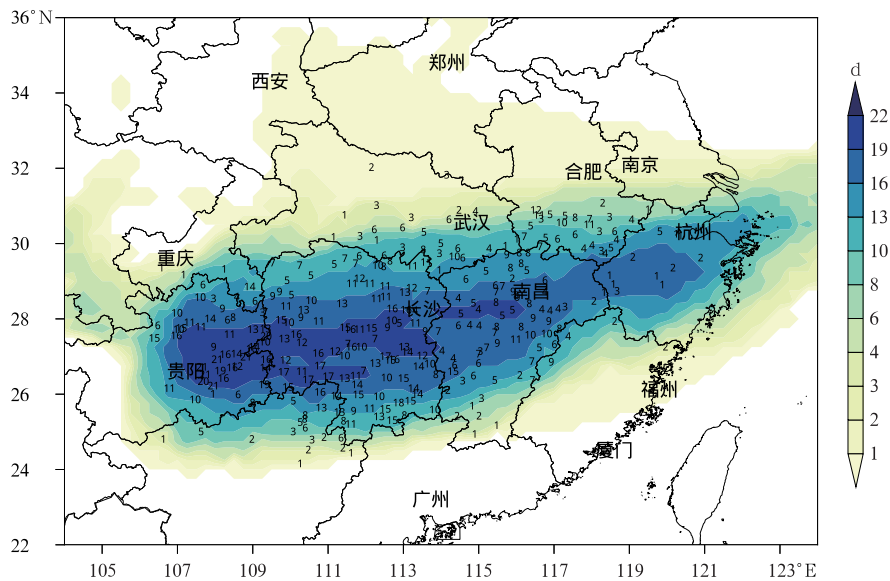


图 10 5 次强冻雨过程推算的冻雨累计日数之和(填色)
Fig. 10 The sum of accumulative days of freezing rain during the 5 heavy freezing rain processes (colored)

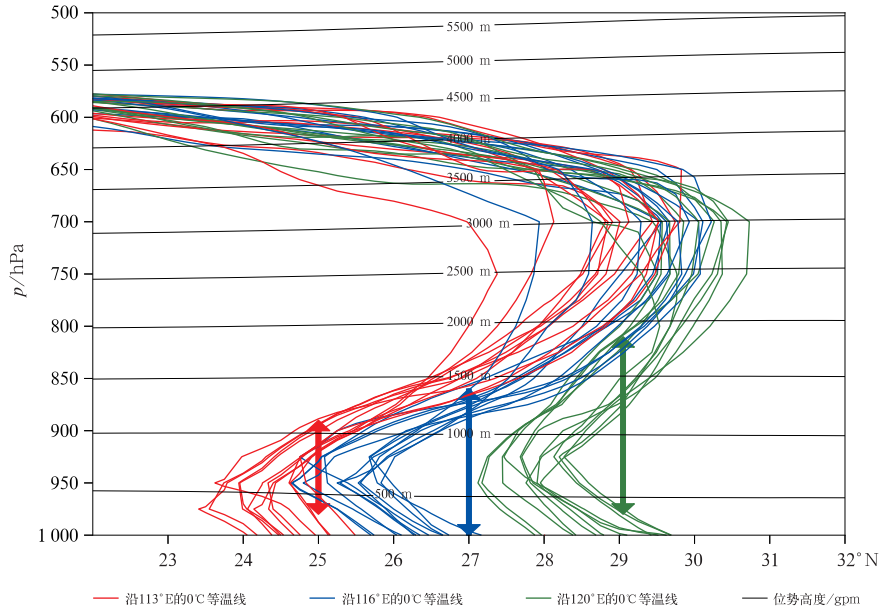


图 11 2008 年 1 月 26—28 日沿不同经度的 0°C 等温线的垂直剖面
 Fig. 11 Vertical across section of 0°C isotherm along different longitudes
 from 26 to 28 January 2008

猫儿山 500~1300 m 的海拔高度为主要结冰区,500 m 以下和 1300~1800 m 较轻,1800 m 以上基本无冰。这说明广西北部 and 广东北部山区的确存在冻雨主要出现在山腰的垂直分布特点。

5 结论与讨论

综合以上分析,得到以下结论:

(1)由地面气象站的雨淞数据结合电网灾情资料确定的中国南方地区的冻雨分布显示:从贵州、湖南、江西,直到浙江,存在一条自西向东,频次由高到低的冻雨带。随着冷暖空气强度的变化,有些年份冻雨带向北移动到达四川、重庆、湖北、安徽南部,有些年份向南移动抵达云南、广西、广东和福建北部。

(2)本文在底层冷层厚度和中间暖层厚度阈值的取值,以及中间暖层判识的气温阈值的取值两个方面对层结分析法进行了改进。改进后的层结分析法较好地推算出了我国南方地区海拔高度在 1000 m 以下区域的冻雨落区及冻雨出现的海拔高度。推算的自 2008 年以来 5 次严重冻雨过程的冻雨落区,不仅涵盖了观测到雨淞的站点,也涵盖了无雨淞数据但有电网覆冰灾情的区域。推算方法给出的冻雨出现的海拔高度,较好地解释了山区无雨淞观测但出现严重冻雨覆冰灾害的情形。该方法计算简单,基于现

有的数值预报模式结果即可实施,在实际业务中有较大的应用价值。

(3)由于受我国南部各大山脉的阻挡,冻雨最南可以发展到广西、广东和福建的北部。浙江省,广西、广东和福建三省(自治区)的北部,出现冻雨时常具有“暖-冷-暖-冷”的层结特点,即冻雨多出现在海拔高度为 300~400 m 以上的山区。其中,广西和广东的北部,由于还受到深厚暖层的影响,冻雨多出现在海拔高度为 300~1300 m 的山腰。

(4)无论是实际观测的雨淞日数分布,还是推算的冻雨日数分布,基本能反映出一次冻雨过程的强弱。但在一些特殊的区域,也有冻雨日数不多但出现严重覆冰灾情的情况。如 2013 年 1 月出现在宁波北仑的严重覆冰灾情,冻雨只持续了 2~3 d,并不是冻雨日数最多的区域。因此,后续需要对这些特殊区域的冻雨进行深入的研究,提出适合这些特殊区域的冻雨强弱的判识方法。

参考文献

- 陈新玉,王传根,戴泽武,等,2018. 2018 年初江西中北部冻雨暴雪天气过程特征及成因[J]. 气象与减灾研究,41(4):270-277. Chen X Y, Wang C G, Dai Z W, et al, 2018. Characteristic and cause of severe freezing rain and snowstorm in early 2018 in Jiangxi[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 41(4): 270-277 (in Chinese).
- 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 Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin, 66(5):808-825(in Chinese).
- 顾骏强,朱特则,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. Gu J Q, Zhu C Z, Jiang Y J, et al, 2010. Application of upper air sounding data to the evaluation of power transmission line ice-coating accidents[J]. Meteor Mon, 36(8):81-86(in Chinese).
- 胡艳楠,牛生杰,吕晶晶,等,2017. 湖北电线积冰统计分析及积冰逆温层结研究[J]. 气候与环境研究, 22(1):35-44. Hu Y N, Niu S J, Lü J J, et al, 2017. Statistical analysis and inversion study on ice accretion in Hubei Province[J]. Climatic Environ Res, 22(1):35-44(in Chinese).
- 黄子平,王春明,韩刚,2005. 华中电网冰闪事故对调度工作的启示[J]. 华中电力, 18(4):25-27. Huang Z P, Wang C M, Han G, 2005. The revelation of power dispatching obtained by studying the transmission lines accidents resulted from covered ice in central China Power Grid[J]. Central China Electric Power, 18(4):25-27(in Chinese).
- 康丽莉,邓芳萍,姜文东,等,2016. 宁波北仑地区的一次冻雨过程分析[J]. 浙江气象, 37(4):1-5, 23. Kang L L, Deng F P, Jiang W D, et al, 2016. The analysis of a process of freezing rain in Beilun of Ningbo[J]. J Zhejiang Meteor, 37(4):1-5, 23(in Chinese).
- 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. Kang L L, Deng F P, Yue P, et al, 2017. A new method of calculating falling zone of freezing rain in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 43(6):756-761(in Chinese).
- 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. Li H J, Li J N, Lin W S, et al, 2011. Simulation study on microphysical process of freezing-rain event in Southern China during the early 2008[J]. Plateau Meteor, 30(4):942-950(in Chinese).
- 李登文,乔琪,魏涛,2009. 2008年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象, 28(5):1140-1148. Li D W, Qiao Q, Wei T, 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of southern China in early 2008[J]. Plateau Meteor, 28(5):1140-1148(in Chinese).
- 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. Li Q F, Fan Z, Wu Q, et al, 2008. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power Syst Technol, 32(9):33-36(in Chinese).
- 林敏,2009. 闽西北地区电线覆冰分析[J]. 电力勘测设计, (6):58-60. Lin M, 2009. Analysis of the features of transmission line icing in northwest Fujian Province[J]. Electr Power Surv Des, (6):58-60(in Chinese).
- 刘朝茹,韩永翔,王瑾,等,2015. 我国冻雨统计及发生机制研究[J]. 灾害学, 30(3):219-222, 234. Liu C R, Han Y X, Wang J, et al, 2015. Studies on statistics and formation mechanism of freezing rain[J]. J Catastrophol, 30(3):219-222, 234(in Chinese).
- 刘平原,何宏明,潘春平,2010. 广东电网2008年冰灾调查分析及其防御措施[J]. 广东电力, 23(3):34-37, 44. Liu P Y, He H M, Pan C P, 2010. Investigation of ice disaster in 2008 and research on deicing in Guangdong Power Grid[J]. Guangdong Electr Power, 23(3):34-37, 44(in Chinese).
- 刘晓梅,高安宁,赵金彪,2013. 2011年华南西部低温雨雪冰冻灾害特征与成因[J]. 自然灾害学报, 22(6):232-239. Liu X M, Gao A N, Zhao J B, 2013. Characteristics and causation of the freezing rain and snow disaster in western South China in 2011[J]. J Nat Dis, 22(6):232-239(in Chinese).
- 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. Luo H B, Li Y D, Yu Z, et al, 2010. Numerical simulation on cloud micro-physical process and inversion layer of freezing rain and snow storm over Southern China in January 2008[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 33(1):16-22(in Chinese).
- 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. Ma X G, Qu X B, Li Y A, et al, 2010. Research and establishment of the basic conceptual model of freezing rain falling zone[J]. Meteor Mon, 36(9):68-73(in Chinese).
- 毛先胤,彭向阳,姚森敬,2012. 粤北输电线路覆冰概况及原因分析[J]. 广东电力, 25(2):62-66. Mao X Y, Peng X Y, Yao S J, 2012. Overview and cause analysis on icing of transmission lines in North Guangdong[J]. Guangdong Electr Power, 25(2):62-66(in Chinese).
- 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 J J, Zhou Y Q, Yang Q, et al, 2011. Analyses on spatial-temporal distributions and temperature-moisture structure of freezing rain in China[J]. Plateau Meteor, 30(3):692-699(in Chinese).
- 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. Sun J H, Zhao S X, 2008. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008[J]. Climatic Environ Res, 13(4):368-384(in Chinese).
- 索渺清,丁一汇,鲁亚斌,等,2018. 中国南方准静止锋对冬季大范围冻雨的影响[J]. 气象学报, 76(4):525-538. Suo M Q, Ding Y H, Lu Y B, et al, 2018. Effects of quasi-stationary fronts in southern China on large-scale freezing rain in winter[J]. Acta Meteor Sin, 76(4):525-538(in Chinese).
- 唐熠,周文志,奚广平,2011. 广西冻雨气候及天气形成的机理分析[J]. 灾害学, 26(2):24-30. Tang Y, Zhou W Z, Xi G P, 2011. Analysis on mechanism of freezing rain climate and weather in Guangxi[J]. J Catastrophol, 26(2):24-30(in Chinese).
- 陶珣,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 Y, Shi Y Q, Liu W G, 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China

- in January 2008[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(3):507-522(in Chinese).
- 王传辉,姚叶青,苗开超,等,2020.安徽省南部两次冻雨天气过程对比分析[J]. *气象*,46(2):169-178. Wang C H, Yao Y Q, Miao K C, et al, 2020. Contrastive analysis of two freezing rain processes in southern Anhui Province[J]. *Meteor Mon*, 46(2):169-178(in Chinese).
- 王传辉,姚叶青,夏令志,等,2019.2018年初安徽省沿江地区输电线路舞动天气成因分析[J]. *高原气象*,38(5):1091-1098. Wang C H, Yao Y Q, Xia L Z, et al, 2019. Cause of the galloping in Anhui Province along the Yangtze River in early 2018[J]. *Plateau Meteor*, 38(5):1091-1098(in Chinese).
- 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 L, Gao G, Zhang Q, 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]. *Meteor Mon*, 34(4):95-100(in Chinese).
- 汪卫平,杨修群,张东海,2020.中国雨淞的时空变化[J]. *气象*,46(5):666-674. Wang W P, Yang X Q, Zhang D H, 2020. Spatio-temporal changes of glaze in China[J]. *Meteor Mon*, 46(5):666-674(in Chinese).
- 许爱华,刘波,郑婧,等,2011.江西冻雨气候特征分析及频发地带成因探讨[J]. *暴雨灾害*,30(1):6-10. Xu A H, Liu B, Zheng J, et al, 2011. Climatic characteristics and cause on frequent freezing rain zone in Jiangxi[J]. *Torr Rain Dis*, 30(1):6-10(in Chinese).
- 杨靖波,李正,杨风利,等,2008.2008年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析[J]. *电网与水力发电进展*,24(4):4-8. Yang J B, Li Z, Yang F L, et al, 2008. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008[J]. *Adv Power Syst Hydroelectr Eng*, 24(4):4-8(in Chinese).
- 余金龙,朱红芳,邱学兴,等,2017.安徽冬季地面降水相态的判别研究[J]. *气象*,43(9):1052-1063. Yu J L, Zhu H F, Qiu X X, et al, 2017. A method to determine winter precipitation type in Anhui[J]. *Meteor Mon*, 43(9):1052-1063(in Chinese).
- 张昕,高守亭,王瑾,2015.2008年1月贵州冻雨的数值模拟和层结构分析[J]. *高原气象*,34(2):368-377. Zhang X, Gao S T, Wang J, 2015. Numerical simulation and stratification structure analysis of freezing rain event in Guizhou in January 2008[J]. *Plateau Meteor*, 34(2):368-377(in Chinese).
- 周绍毅,苏志,李强,2010.广西导线覆冰的特征及其气候成因研究[J]. *安徽农业科技*,38(21):11337-11339. Zhou S Y, Su Z, Li Q, 2010. Study on characteristics and climatic causes of conductor icing in Guangxi[J]. *J Anhui Agri Sci*, 38(21):11337-11339(in Chinese).
- 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. Zong Z P, Ma J, 2011. The relationship between the strength variability of freezing rain and the character of inversion in the beginning of 2008[J]. *Meteor Mon*, 37(2):156-160(in Chinese).
- 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 Z P, Ma J, Zhang H D, et al, 2013. Analysis on the spatial-temporal characteristics of freezing rain in recent decades[J]. *Meteor Mon*, 39(7):813-820(in Chinese).