



福建霜冻时空分布特征及环流背景分析

吴幸毓*, 林毅, 陈文键, 何小宁

福建省气象台, 福建 福州 350001

* 联系人, E-mail: omegawu@163.com

2014-11-17 收稿, 2015-06-17 接受

福建省自然科学基金资助项目(2014J01147); 福建气象局青年科技专项资助项目(2012q02)

摘要 利用福建省内 68 个地面测站 1981—2011 年 1—4 月、10—12 月逐日观测资料, 结合最低地表温度、天气现象、最低气温作为福建霜冻判别指标, 探讨福建霜冻气候特征及环流背景形势。研究发现: 1) 福建年平均霜冻天数、初(终)霜冻日、无霜冻期具有明显地域差异, 等值线基本呈东北—西南走向, 与台站海拔高度具有良好相关性。区域平均初霜冻日、终霜冻日、无霜冻期总体分别呈推迟、提前、延长的变化趋势。2) 全省大范围霜冻天气呈现发生频率低、过程持续时间短、总体逐渐减少的特征。3) 霜冻越强, 发生越晚, 结束越早, 且出现天数越少。4) 随着形势场特征线略有南压, 霜冻逐渐增强, 反之减弱。

关键词

霜冻判别指标
初、终霜冻日
无霜冻期
气候统计特征
环流背景形势

霜冻, 是指作物表面以及近地面空气层的温度迅速下降到作物生长的临界温度或以下时足以引起作物枯萎或死亡的现象, 它是我国发生范围广、危害作物种类多、造成经济损失大的一种农业气象灾害, 北至黑龙江, 南至广东、广西均存在霜冻灾害(陈乾金和张永山, 1995; 吴国兴等, 2003; 温晶等, 2010)。霜冻在我国有两种情况, 一是早、晚霜冻, 发生在较温暖时期; 二是冷季霜冻, 发生在温暖地区, 出现频率小(崔读昌, 1999)。福建属于第二种情况, 虽然总体上影响福建的冷空气弱于北方, 但因福建境内的作物(热带、亚热带作物)对冷空气的抵御能力较弱, 较强的冷空气活动也会给农作物带来重大影响(宋德众和蔡诗树, 2007)。叶殿秀和张勇(2008)采用 577 个测站资料分析我国 1961—2007 年霜冻变化特征, 指出南方地区应特别注意预防极端霜冻影响。比如 1999 年, 福建大部遭受几十年以来最为严重的霜冻灾害, 全省农作物受灾和成灾面积分别达 26.0、22.1 万公顷, 部分县市经济损失超亿元(陈晓华, 2009)。

至今, 针对福建霜冻的研究较少, 多为基础性研究工作(何小宁和吴幸毓, 2012)。本文首先结合最

低地表温度、霜或结冰天气现象、最低气温, 给出福建霜冻判别指标, 据此对福建霜冻气候特征作细致、深入的分析, 揭示其产生环流背景条件, 并对适应福建不同强度霜冻开始与结束的环流特征作了初步研究, 有助于福建霜冻的预报预警和防灾减灾工作。

1 资料与统计说明

1.1 资料

1) 福建省内 68 个地面测站 1981—2011 年 1—4 月、10—12 月(共 31 a, 217 个月)逐日观测资料, 选取其中最低地表温度、天气现象、最低气温三个要素, 作为福建霜冻判别指标。2) 利用同期 NCEP/NCAR 一日四次

再分析资料(格距 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$), 分析霜冻天气环流形势。

1.2 统计说明

由温暖季节向寒冷季节过渡第一次出现霜冻的日期, 为初霜冻日; 反之, 由寒冷季节向温暖季节过渡最后一次出现霜冻的日期, 为终霜冻日。全年仅一天出现霜冻, 则该日既为初霜冻日, 也是终霜冻日。为便于统计和表述, 将初、终霜冻日分别进行数

引用格式: 吴幸毓, 林毅, 陈文键, 等, 2016. 福建霜冻时空分布特征及环流背景分析[J]. 大气科学学报, 39(4): 501-509.

Wu X Y, Lin Y, Chen W J, et al., 2016. Temporal and spatial distribution characteristics of frost injury in Fujian and its circulation background[J]. Trans Atmos Sci, 39(4): 501-509. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20141117003. (in Chinese).

值化,以日序表示,把 6 月 1 日定为 1,6 月 2 日定为 2,以此类推,次年 1 月 1 日为 215。将 1—4 月初霜冻日归并为上一年冬季初霜冻记录;同理,10—12 月终霜冻日列入次年春季终霜冻记录中。邻近的终霜冻日与初霜冻日之间的日数,称为无霜冻期。

2 霜冻判别指标

农业气象上,通常设定最低地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为判定霜冻的指标(姜会飞,2008;李芬等,2012)。但是,受条件限制,最低地表温度的历史观测资料多有缺失,部分学者改用最低气温进行研究,比如 Easterling(2002)、Scheifinger(2002)、李娇等(2014)以逐日最低气温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 判定霜冻日;叶殿秀和张勇(2008)、张旭晖等(2013)则以 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为霜冻的气候指标。最低气温与最低地表温度之间没有转换公式,在最低温度阈值的选取上,目前尚无统一标准,本文通过大量统计确定适合福建的阈值,稍后给出详细说明。

另外,“霜”,也称“白霜”,是近地面空气中水汽直接凝华在温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的地面上或近地面物体上的白色松脆冰晶(《大气科学辞典》编委会,1994)⁵⁷⁶,它是一种天气现象。而“霜冻”是指植物生长季节里因土壤表面和植株体温度降低到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下而引起植物冻害,是一种农业气象灾害(《大气科学辞典》编委会,1994)⁵⁷⁶。霜和霜冻两者既有区别,又有联系。当霜冻发生时,不一定能观测到“白霜”,这取决于空气潮湿程度,农民称之为“黑霜”或“暗霜”。但有霜时,却经常伴有程度不同的霜冻(冯玉香,1996)。“结冰”是露天水面(包括蒸发皿中的水)在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下冻结成冰的现象(《大气科学辞典》编委会,1994)³³¹。霜和结冰同属于地面气象观测内容,也可作为评判地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的补充

表 1 最低气温与天气现象(有霜或结冰)、最低地表温度对应的站次比例

Table 1 Stations and times proportions with lowest temperature, weather phenomena(frost or ice), and lowest ground surface temperature %

前提条件	最低地表 温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	有霜或结冰天气现象 (即“白霜”,记为 A)	无霜和结冰,最低地表 温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (即“黑霜”,记为 B)	最低气温		
				$\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$	70.75 ¹⁾	74.71 ¹⁾	5.53 ¹⁾			
最低气温 $\leq 3\text{ }^{\circ}\text{C}$	57.55	63.40	5.47			
$\leq 4\text{ }^{\circ}\text{C}$	45.44	52.17	4.63			
最低地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$				87.30 ¹⁾	95.23	98.27
有霜或结冰天气现象				79.57 ¹⁾	89.88	96.26

注:1)代表最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的对应情况.

(林良勋等,2000)。

统计研究时段内福建省地面观测资料,发现当最低地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最低气温较最低地表温度平均高出 $1.69\text{ }^{\circ}\text{C}$;当出现霜或结冰天气现象时,二者差值平均为 $1.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另外,福建霜冻预警信号发布标准规定:“当 24 h 内最低气温将要下降到 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,发布霜冻蓝色预警信号”。为选取最低气温的最佳阈值,针对最低气温 $\leq 2、3、4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别进行如下统计(表 1):

假设将最低气温作为最低地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的预报指标,由上表计算可得,以 $2、3、4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为临界值的预报空报率分别为 $29.25\%、42.45\%、54.56\%$;同法求得, $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在对“白霜”及“黑霜”的预报中空报率(计算公式 $=1-A-B$)也最小(19.76%)。最低地表温度或天气现象达标前提下,最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的样本比例分别达到 $87.30\%、79.57\%$ 。权衡各项统计参数,最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较 3 或 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 表现出更好的预报效果,故 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是最低气温阈值的最优选择。

由此,相比之前福建研究(何小宁和吴幸毓,2012)仅取最低地表温度单一评判,将上述三个要素结合作为霜冻判定标准更为完善,即当最低地表温度 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,或者地面观测有霜或结冰现象,或者最低气温 $\leq 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,定义出现霜冻。这一判则表征了冷空气的强度和降温条件的共同作用。

3 霜冻气候特征分析

3.1 霜冻天数、初(终)霜冻日、无霜冻期空间分布特征

从 1981—2011 年福建年平均霜冻天数分布(图 1)可以看出,福建省霜冻天数具有明显的地理分布特征,等值线基本呈东北—西南走向,自北向南递减;叠加福建地形,发现霜冻天数与台站海拔高度具

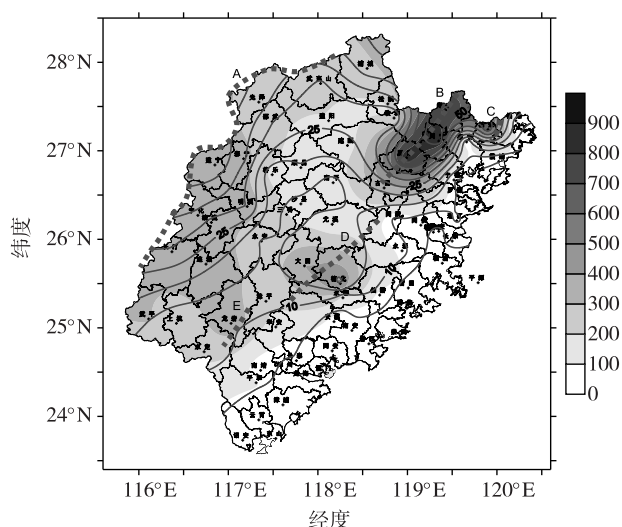


图1 1981—2011年福建年平均霜冻天数(等值线;单位:d)的空间分布(阴影为福建地形,单位:m;粗点线表示福建主要山脉,A—E分别表示武夷山、鹺峰山、太姥山、戴云山、博平岭)

Fig.1 Spatial distribution of the mean number of frost injury days from 1981 to 2011 (contours; units: d) [shading indicates the relief of Fujian, units: m; thick dotted lines from A to E indicate the main mountains in Fujian, such as Wuyi Mountain, Jiufeng Mountain, Taimu Mountain, Daiyun Mountain, and Bopingling Mountain]

有良好相关性(相关系数达0.8293)。西部、北部地区及高海拔山区,受冷空气影响大,降温较快,霜冻天气容易出现,年平均霜冻天数达25 d以上,其中以闽东北的鹺峰山及太姥山一带(寿宁、周宁、屏南、柘荣平均海拔819 m)为最多(48~56 d)。沿海地区的丘陵地带,更易受海洋气候影响,31 a间极少出现霜冻,年均值在10 d以下,其中东山终年无霜冻。鹺峰山—戴云山—博平岭与武夷山之间的闽中谷地及沿海地区内陆县市,霜冻天数介于上述二者之间。由此,将福建省9地市的68个测站分为三个区域,分别记为I、II、III区(如图2所示),三个分区站点数分别为17、19、32。

分析年平均初(终)霜冻日、无霜冻期空间分布特征(图略),可知,三者与年均霜冻天数相关性极高(相关系数绝对值约为0.95),同样具有明显的地域差异,也按三个区域呈阶梯状排列(详见表2)。初霜冻日与终霜冻日呈反相关,即从西部、北部高海拔地区向东南部沿海,区域平均初霜冻日从11月下旬逐渐推迟至12月底;反之,终霜冻日从3月上旬末逐渐提前到1月底;鹺峰山脉附近为全省最早

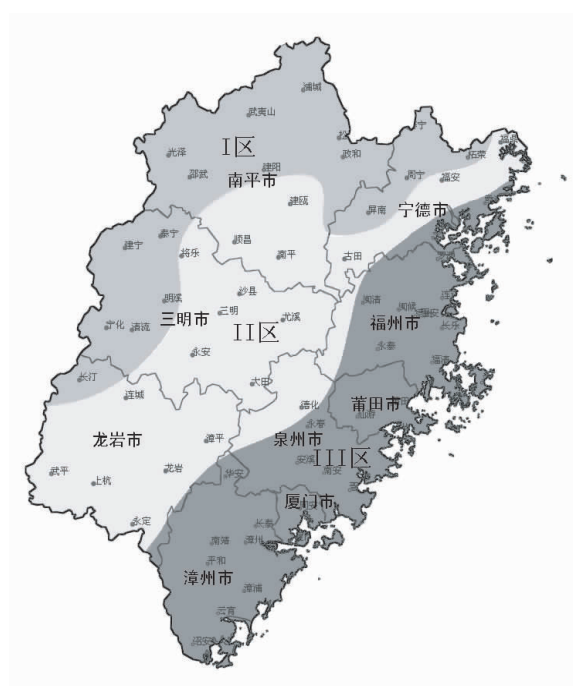


图2 福建省68个地面测站的霜冻分区示意图

Fig.2 Frost injury partitioning based on 68 meteorological stations in Fujian

出现霜冻、最晚结束霜冻的区域。全省三个霜冻分区多年平均无霜冻期基本持续8个月以上,最小值同样出现于鹺峰山脉区域(230.4 d);中南部临海站点(平潭、秀屿、崇武、厦门、东山)31 a间霜冻天数总计不足10 d,近乎全年无霜冻。表2同时给出各分区初(终)霜冻日历年最早(晚)极值出现站点及日期,对比极值较年均值的提前(推迟)量,III区比I区提前(推迟)幅度大,II区介于二者之间。综上,福建霜冻天气与福建地形及福建所处地理位置有紧密关系。

3.2 初(终)霜冻日、无霜冻期的年际变化特征

对于III区,尤其是临海站点,霜冻样本少,仅个别较冷年份才出现,且初霜冻晚、终霜冻早。为保证样本统一性,仅针对I、II区(共36站)分析平均初(终)霜冻日、无霜冻期的年际变化特征(如图3所示)。

对比初、终霜冻日年际变化曲线(图3a、b),可以看出,初霜冻日大体呈推迟变化趋势,终霜冻日缓慢提前,其气候倾向率分别为 0.3585 、 -0.1273 $d \cdot a^{-1}$,初霜冻日变化趋势略大于终霜冻日,但二者均不显著,仅初霜冻日通过0.1信度检验。近30 a间,初(终)霜冻日年代均值(图中横虚线表示)略有起伏,80、90、00年代日序分别为179.4、187.7、185.5(273.8、269.4、270.8),前两段时期变化相对

表 2 1981—2011 年福建各霜冻分区初、终霜冻日及无霜冻期的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of the first date, last date and the number of days free of frost injury over Fujian from 1981 to 2011

区域	初霜冻日		终霜冻日		无霜冻期 /d
	多年区域平均 (日期)	历史最早极值 (站点/日期)	多年区域平均 (日期)	历史最晚极值 (站点/日期)	
I 区	11-23	屏南/1992-10-19	03-09	寿宁、周宁、屏南、柘荣/1996-04-23	230~270
II 区	12-09	福安/1986-11-02	02-17	福鼎/1988-04-09	270~330
III 区	12-29	南靖/1992-11-10	01-30	霞浦/1987-03-26	>330

较明显,最大幅度为 $8.3 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。相应的,无霜冻期大体呈延长趋势(图 3c),气候倾向率为 $0.494 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,同样波动大、趋势不显著(仅通过 0.2 信度检验),极差达 59.9 d(2000 年最大,为 312.1 d;1995 年最小,为 252.2 d)。Zhai and Pan (2003)、叶殿秀和张勇(2008)利用近 50 a 来我国 577 个测站逐日最低气温资料分析了我国霜冻的气候变化特征,也得到类似结论。

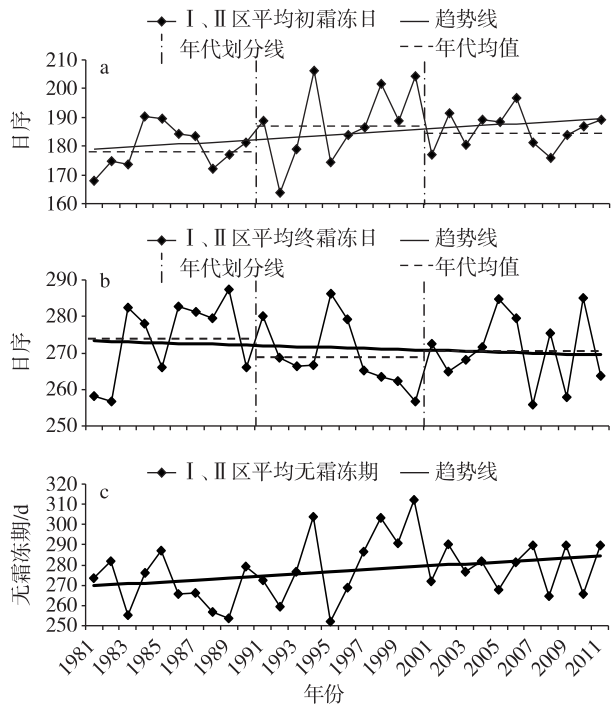


图 3 1981—2011 年福建 I、II 区平均初(a)、终(b)霜冻日序及无霜冻期(c)的年际变化

Fig.3 Interannual variation of the (a) first date, (b) last date and (c) the number of frost injury-free days of frost injury in Region I and II over Fujian from 1981 to 2011

3.3 全省区域霜冻日的年际变化及持续性特征

以上对于霜冻时空分布特征的分析均基于站点出发,而霜冻过程的讨论要从面上着眼。引入区域霜冻日概念,当区域内 $\geq 1/3$ 站点出现霜冻天气,认为该区域出现大范围霜冻,此日即为该区域霜冻日。

1981—2011 年,全省性霜冻日总计 571 d,平均每年 18.4 d,大范围霜冻发生频率较低;由图 4 可知,1986 年最多,达 38 d,1998 年最少,仅 4 d。年际变化曲线总体呈下降趋势。其中,20 世纪 80、90 年代起伏大,年代均值分别为 21.3、15.9 d;进入 21 世纪,变化较为平稳,基本稳定在年代均值 18.1 d 附近振荡。

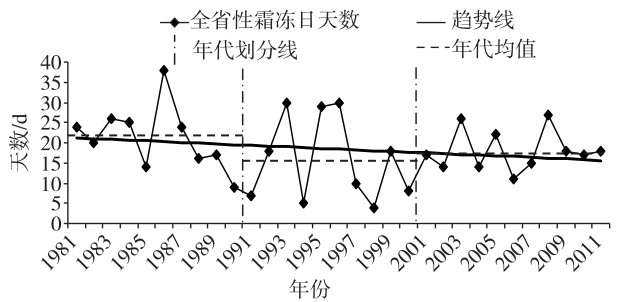


图 4 1981—2011 年全省区域霜冻日的年际变化

Fig.4 Interannual variation of the number of frost injury days for the whole province from 1981 to 2011

统计分析全省区域霜冻过程的持续性特征(表 3),36.79% 的全省区域霜冻天气仅 1 d 后便得到缓解,总计 78 次,为最多数情况;其次是维持 2~3 d 的过程,分别出现 52、35 次,占 24.53%、16.51%;过程持续 4 d 及以上发生频次大幅降低,合计仅 48 次,占样本总数 22.17%。由此可知,福建全省区域霜冻过程的持续时间普遍较短。31 a 间,持续 $\geq 10 \text{ d}$ 的过程共 4 次,其中最长记录为 16 d(2001-12-22—2002-01-06)。

表 3 1981—2011 年全省区域霜冻过程统计
Table 3 Frost injury statistics for the whole province from 1981 to 2011

过程持续天数/d	出现次数/次	出现率/%
1	78	36.79
2	52	24.53
3	35	16.51
4	18	8.49
5	10	4.72
6	5	2.36
7	2	0.94
8	5	2.36
9	3	1.42
10	1	0.47
12	2	0.94
16	1	0.47

3.4 霜冻强度的旬变化特征

普查研究时段内(共计 6 579 d)三个分区各自的区域霜冻日,发现 I、II、III 区分别有 1 256、601、179 d。其中(除 1996 年 2 月 4 日外),其余样本均显示,III 区霜冻日同时也是 I、II 区霜冻日,此时 I、II 区霜冻站数分别为 16~17 站、13~19 站,几乎覆盖全区范围;II 区霜冻日时,I 区必定也出现大范围

霜冻,出现站数≥8 站。福建所处地理位置和地形特点决定福建霜冻过程必然是自北而南,从 I 区逐渐扩展到 II 区,再蔓延至 III 区。另外,II、III 区多种植亚热带、热带作物,对霜冻更为敏感;而对于 I 区,受气候条件限制,所种植经济作物在霜冻季节基本已收成完毕,霜冻可能造成的危害较弱。由此,定义霜冻强度:以区域内出现大范围霜冻(≥1/3 站)为衡量标准,仅 I 区出现大范围霜冻,为弱霜冻;大范围霜冻扩展至 II 区,为中等强度霜冻(简称中霜冻,下同);当 III 区也达到标准,即全省大部均出现霜冻,称为强霜冻。

表 4 给出霜冻强度的旬变化统计,可见,霜冻越强,发生越晚、结束越早,且出现天数越少。弱霜冻于 10 月下旬开始出现,4 月上旬仍偶有发生,平均每年发生 21.10 d;主要集中于 12 月中旬至 2 月上旬爆发,其中 1 月下旬最密集(年平均 2.77 d);中霜冻从 11 月中旬开始,强霜冻更晚一句,两者最晚结束记录均为 3 月中旬。中、强霜冻全年总天数的多年平均值分别达 13.61、5.81 d。12 月下旬为中、强霜冻相对高发期,多年平均出现天数分别为 2.23、1.23 d,在此期间,中霜冻甚至较弱霜冻更易出现。

表 4 霜冻强度的旬变化统计特征
Table 4 Ten-day variation statistics for frost injury intensity

旬	弱霜冻		中霜冻		强霜冻	
	总天数/d	31 a 平均/(d·a ⁻¹)	总天数/d	31 a 平均/(d·a ⁻¹)	总天数/d	31 a 平均/(d·a ⁻¹)
10 月下旬	1	0.03				
11 月上旬	7	0.23				
11 月中旬	27	0.87	7	0.23		
11 月下旬	27	0.87	19	0.61	2	0.06
12 月上旬	49	1.58	64	2.06	5	0.16
12 月中旬	69	2.23	46	1.48	21	0.68
12 月下旬	60	1.94	69	2.23	38	1.23
1 月上旬	64	2.06	46	1.48	29	0.94
1 月中旬	64	2.06	50	1.61	28	0.90
1 月下旬	86	2.77	38	1.23	26	0.84
2 月上旬	62	2.00	38	1.23	15	0.48
2 月中旬	42	1.35	12	0.39	8	0.26
2 月下旬	30	0.97	14	0.45	1	0.03
3 月上旬	46	1.48	17	0.55	6	0.19
3 月中旬	11	0.35	2	0.06	1	0.03
3 月下旬	6	0.19				
4 月上旬	3	0.10				
总和	654	21.10	422	13.61	180	5.81

4 环流背景形势分析

利用同期 NCEP/NCAR 一日四次再分析资料,分三部分剖析福建霜冻天气的环流特征。1) 分析全省性霜冻日 08 时(北京时间,下同)平均形势场,了解福建霜冻天气总体环流背景;2) 对比分析不同霜冻强度开始日 08 时平均形势,旨在揭示霜冻爆发从无到有、从弱到强的形势场指标,当影响福建冷空气达到相应标准并将继续增强或维持,分别相对应的 I、II、III 区将开始出现大范围霜冻;3) 同理,分析不同霜冻强度结束日次日 08 时平均形势,找到过程减弱、甚至完全解除的形势场指标,当影响福建冷空气达到相应标准且将继续减弱,预示对应区域大范围霜冻即将结束。

4.1 全省性霜冻环流形势分析

图 5a、b、c 分别给出福建全省区域霜冻日 08 时 500、850 hPa 和地面平均形势场。

500 hPa(图 5a),东亚大槽位于 125°E 以东,槽底伸至 30°N 以南,568 dagpm 线横穿浙江南部,福建受偏西到西北气流控制;低涡槽内有 -36 °C 冷区配合,-28 °C 线穿过山东半岛,-12 °C 线南压至福建中部;温度槽落后于高度槽,冷平流明显;环流经向度大,槽后强盛的西北气流引导冷空气大举南下,影响我国东部地区,尤其是西路冷空气,往往造成较大

范围急剧降温。

850 hPa(图 5b),高压中心一般位于湖南北部,福建为高压前部偏北到东北气流控制,风速小;温度场上,我国东部地区为冷槽控制,槽底位置较南,冷平流强;0 °C 线已南压临近福建,4 °C 线压至福建南部。

由平均海平面气压场(图 5c)可见,我国东部大部地区在冷高压控制下,高压主体位于长江以南(中心强度达 1 029.5 hPa),高压后部仍有冷空气从西路或中偏西路不断扩散南下。根据预报经验,冷高压中心位于 30~32°N 之间时,福建受其控制,以晴好天气为主,夜间辐射降温明显,易造成霜冻。

4.2 不同霜冻强度开始日天气形势对比分析

对比霜冻由无一弱、弱一中、中一强三个发展过程的开始日 08 时 500、850 hPa 和地面平均形势场特征参数(表 5),总体而言,霜冻强度与形势场特征线位置有密切关系,特征线越偏南,霜冻越强。各特征参数大多在中一强过渡阶段不如弱一中阶段南压明显。这是因为大范围霜冻扩展到 II 区之后,冷空气南袭势头往往减弱,冷高压主体维持在长江中下游地区,强度不再增强,冷空气从东南沿海扩散南下,有利于 III 区出现霜冻。其次,强霜冻基本仅维持 1~2 d,很快在回暖形势下缓解,地面温度对高空的温度变化存在滞后反应,当高空特征温度线已经开

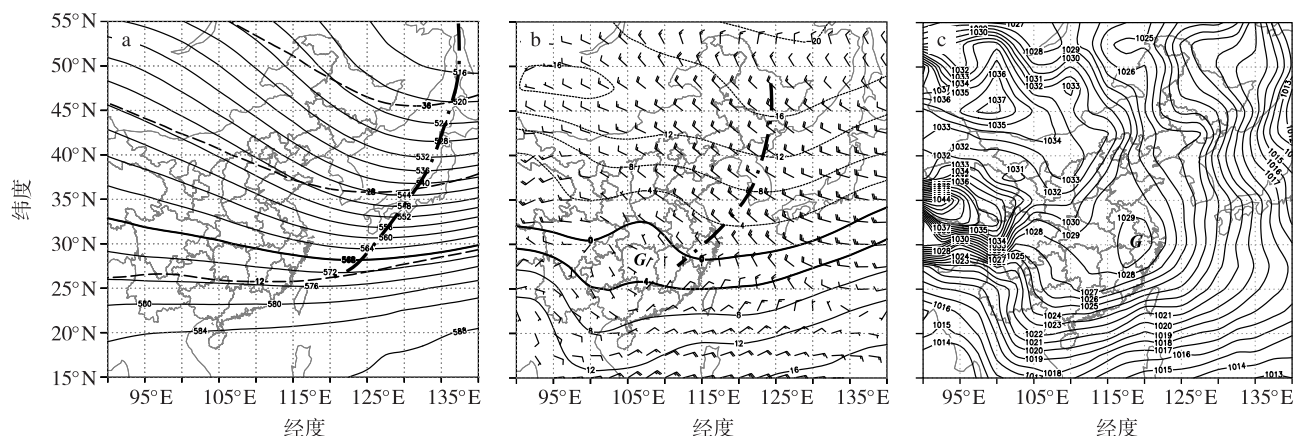


图 5 全省区域霜冻日 08 时(北京时间,下同)500 hPa(a;实线为高度,单位:dagpm,568 dagpm 线加粗显示;虚线为温度,单位:°C;点划线为东亚大槽),850 hPa(b;实(虚)线为正(负)温度,单位:°C,0、4 °C 线加粗显示;点划线为温度槽)和海平面(c;等值线为气压,单位:hPa)平均形势场(G 为标记的高压中心)

Fig.5 Analysis of the weather situation mean-field at 0800 BST on frost injury days for the whole province (the position of the high pressure center is denoted by "G"): (a) 500 hPa [height field shown by solid lines (units: dagpm, with 568 dagpm for thickening); temperature field indicated by dashed lines (units: °C); position of the East Asian trough indicated by the dashed-dotted line]; (b) 850 hPa [temperature field shown as solid lines for positive numbers and dashed lines for negative numbers (units: °C, with 0 °C and 4 °C for thickening); positions of the temperature trough indicated by the dashed-dotted line]; (c) SLP field (solid lines; units: hPa)

表 5 不同霜冻强度开始日 08 时平均形势场特征参数对比

Table 5 Comparison of the weather situation mean-field at 0800 BST on the day of frost injury beginning with different intensity

霜冻强度	500 hPa 特征参数					850 hPa 特征参数				地面特征参数	
	东亚大槽位置	东亚大槽槽底	568 dagpm 线	-28 ℃ 线	-12 ℃ 线	高压中心	0 ℃ 线	4 ℃ 线	风场	冷高压	1 025 hPa 线
弱		约 29.0°N ¹⁾	29.0°N ¹⁾	36.7°N ¹⁾	27.0°N ¹⁾	陕西南部	28.0°N ²⁾	25.6°N ²⁾			26.0°N ²⁾
中	大致稳定维持于 125°E 以东	约 28.0°N ¹⁾	28.0°N ¹⁾	35.4°N ¹⁾	26.4°N ¹⁾	陕西南部	27.0°N ²⁾	24.6°N ²⁾	风向、风速变化不明显,华南地区为 2~4 m·s ⁻¹ 东北风控制	冷高压控制,高压中心位于 31~29°N 之间	25.0°N ²⁾
强		约 27.0°N ¹⁾	27.2°N ¹⁾	34.7°N ¹⁾	26.0°N ¹⁾	湖南北部	26.5°N ²⁾	23.7°N ²⁾			24.3°N ²⁾

注:1)表示特征线与 125°E 相交的纬度;2)表示特征线与 120°E 相交的纬度.

始逐渐北抬时,晴空辐射致使地面温度在较低水平基础上继续下降,造成霜冻范围扩大。

4.3 不同霜冻强度结束日天气形势对比分析

表 6 给出霜冻由强一中、中一弱、弱一无三个减弱过程的结束日次日 08 时 500、850 hPa 和地面平均形势场特征参数对比情况。与初始日相反,随着特征线逐渐北抬,霜冻由强到弱,直至完全解除。相较于初始日,500 hPa,东亚大槽东移约 15 个经距,槽底北缩。850 hPa,冷高压东移入海,西北地区到长江中上游一带高压中心消失,取而代之,台湾岛东

北方向出现海上小高压;华南地区转为海上高压后部偏南气流控制,有弱的暖平流;等温线平直,特征温度线北抬明显。地面场上,海平面气压梯度显著减小。

5 结论

本文结合最低地表温度、霜或结冰天气现象、最低气温三者,给出更为完善的福建省霜冻判别标准,并据此研究福建霜冻气候态特征及环流背景形势,得到如下结论:

表 6 不同霜冻强度结束日次日 08 时平均形势场特征参数对比

Table 6 Comparison of the weather situation mean-field at 0800 BST on the next day of frost injury ending with different intensity

霜冻强度	500 hPa 特征参数					850 hPa 特征参数				地面特征参数	
	东亚大槽位置	东亚大槽槽底	568 dagpm 线	-28 ℃ 线	-12 ℃ 线	高压中心	0 ℃ 线	4 ℃ 线	风场	冷高压	1 025 hPa 线
弱			31.0°N ¹⁾	38.9°N ¹⁾	27.2°N ¹⁾		33.3°N ²⁾	29.4°N ²⁾			29.6°N ²⁾
中	大致稳定维持于 140°E 以东	槽底北缩,大致位于 30°N 以北	30.2°N ¹⁾	38.6°N ¹⁾	26.9°N ¹⁾	台湾岛东 北方向的 东海海面 上出现小 高压	32.6°N ²⁾	28.3°N ²⁾	风向、风速变化不明显,华南地区为 2~4 m·s ⁻¹ 偏 南风控制	冷高压变 性,减压 明显	27.8°N ²⁾
强			29.6°N ¹⁾	37.8°N ¹⁾	26.7°N ¹⁾		31.9°N ²⁾	27.6°N ²⁾			26.8°N ²⁾

注:1)表示特征线与 125°E 相交的纬度;2)表示特征线与 120°E 相交的纬度.

1) 福建年平均霜冻天数、初(终)霜冻日、无霜冻期具有明显地域差异,等值线基本呈东北—西南走向,与台站海拔高度具有良好相关性。据此,可将全省划分三个霜冻区域,西部、北部地区及高海拔山区(I区)最易出现霜冻,且最早开始、最晚结束,无霜冻期最短;沿海地区的丘陵地带(III区)极少出现霜冻。I、II区平均初霜冻日、终霜冻日、无霜冻期大体分别呈现推迟、提前、延长的变化趋势。

2) 福建全省大范围霜冻天气发生频率低,平均每年 18.4 d,总体呈减少趋势,20 世纪 80、90 年代起伏大,进入 21 世纪变化较平稳。霜冻过程持续时间短。

3) 以霜冻范围大小定义其强弱程度,范围越

广,则强度越强,且发生越晚、结束越早、出现天数越少。强霜冻只出现在 11 月下旬至次年 3 月中旬。

4) 500 hPa,环流经向度大,568 dagpm 线横穿浙江南部,东亚大槽槽后有 -36°C 冷区配合,冷平流明显;850 hPa, 0°C 温度线南压临近福建;地面上,我国东部大部地区受冷高压控制,中心强度平均可达 1 029 hPa。在这样的环流背景下,福建以晴好天气为主,夜间辐射降温明显,易造成霜冻。

5) 霜冻强度与形势场特征线位置有密切关系。随着形势场特征线略有南压,霜冻逐渐增强,特征线在霜冻中一强过渡阶段不如弱一中阶段南压明显。与之相反,随着特征线逐渐北抬,霜冻由强到弱,直至完全解除。

参考文献(References)

- 陈乾金,张永山,1995.华北异常初终霜冻气候特征研究[J].自然灾害学报,4(3):33-39. Chen Q J,Zhang Y S,1995.Climatic characteristics of anomaly first and last frost injury in North China[J].J Natural Disasters,4(3):33-39.(in Chinese).
- 陈晓华,2009.新中国农业 60 年统计资料[M].北京:中国农业出版社. Chen X H,2009.Agricultural statistics of China during the past 60 years[M]. Beijing:China Agricultural Press.(in Chinese).
- 崔读昌,1999.关于冻害、寒害、冷害和霜冻[J].中国农业气象,20(1):56-57. Cui D C,1999.About freeze injury,cold injury,chilling injury and frost injury[J].Chinese Journal of Agrometeorology,20(1):56-57.(in Chinese).
- 大气科学辞典编委会,1994.大气科学辞典[M].北京:气象出版社. Editorial board of dictionary of atmospheric sciences,1994.Dictionary of atmospheric sciences[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- Easterling D R,2002.Recent changes in frost days and the frost-free season in the United States[J].Bull Amer Meteor Soc,83(9):1327-1332.
- 冯玉香,何维勋,1996.霜冻的研究[M].北京:气象出版社. Feng Y X,He W X,1996.Study on frost injury[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 何小宁,吴幸毓,2012.近三十年福建省霜冻天气的气候变化特征[J].海峡科学,68(8):3-8. He X N,Wu X Y,2012.Climatic characteristics of frost injury over Fujian during the past 30 years[J].Straits Science,68(8):3-8.(in Chinese).
- 姜会飞,2008.农业气象学[M].北京:科学出版社. Jiang H F,2008.Agrometeorology[M].Beijing:China Science Press.(in Chinese).
- 李芬,于文金,张建新,等,2012.山西近 50 a 初霜冻的气候变化特征及其周期分析[J].大气科学学报,35(6):754-761. Li F,Yu W J,Zhang J X,et al.,2012.Analysis of the climate change characteristics and periodicity of the first frost in Shanxi Province in the past 5 decades[J].Trans Atmos Sci,35(6):754-761.(in Chinese).
- 李娇,任国玉,任玉玉,等,2014.资料均一化对沈阳站气温趋势和城市化偏差分析的影响[J].大气科学学报,37(3):297-303. Li J,Ren G Y,Ren Y Y,et al.,2014.Effect of data homogenization on temperature trend estimation and urban bias at Shenyang station[J].Trans Atmos Sci,37(3):297-303.(in Chinese).
- 林良勋,薛登智,梁健,等,2000.近二十年广东的霜冻气候及其变化特征[J].广东气象,22(4):7-9. Lin L X,Xue D Z,Liang J,et al.,2000.Climatic change characteristics of frost injury over Guangdong during the past 20 years[J].Guangdong Meteorology,22(4):7-9.(in Chinese).
- Scheffinger H,Menzel A,Koch E,et al.,2002.Trends of springtime frost events and phenological dates in Central Europe[J].Theor Appl Climatol,74(1):41-51.
- 宋德众,蔡诗树,2007.中国气象灾害大典(福建卷)[M].北京:气象出版社. Song D Z,Cai S S,2007.Chinese Meteorological treasury(Fujian Part)[M].Beijing:China Meteorological Press.(in Chinese).
- 温晶,胡丽甜,李霞,等,2010.近 55 年广州霜冻的年际和年代际变化特征[J].广东气象,32(2):1-3. Wen J,Hu L T,Li X,et al.,2010.Inter-annual and Inter-decadal variations of the frost injury in Guangzhou during the past 55 years[J].Guangdong Meteorology,32(2):1-3.(in Chinese).
- 吴国兴,高安宁,陈业国,等,2003.广西异常霜冻天气过程特征指数研究[J].广西科学,10(1):72-74,80. Wu G X,Gao A N,Chen Y G,et al.,2003.Characteristic indices of abnormal frostbite weather process of Guangxi[J].Guangxi Sciences,10(1):72-74,80.(in Chinese).
- 叶殿秀,张勇,2008.1961—2007 年我国霜冻变化特征[J].应用气象学报,19(6):661-665. Ye D X,Zhang Y,2008.Characteristics of frost injury changes from 1961 to 2007 over China[J].J Appl Meteor Sci,19(6):661-665.(in Chinese).
- Zhai P M,Pan X H,2003.Trends in temperature extremes during 1951—1999 in China[J].Geophys Res Lett,30(17):CLM 9-1-CLM 9-4.
- 张旭晖,居为民,蒯志敏,等,2013.江苏春季霜冻气候变化特征及其未来可能变化趋势[J].大气科学学报,36(6):666-673. Zhang X H,Ju W M,Kuai Z M,et al.,2013.Historical variation and possible future trends of spring frost in Jiangsu province[J].Trans Atmos Sci,36(6):666-673.(in Chinese).

Temporal and spatial distribution characteristics of frost injury in Fujian and its circulation background

WU Xingyu, LIN Yi, CHEN Wenjian, HE Xiaoning

Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001, China

Frost injury has great influence for tropical and subtropical crops in Fujian. Such crops possess poor ability to resist cold air, and so studying their frost injury characteristics is extremely important for disaster prevention and reduction.

Firstly, based on daily meteorological observational data at 68 stations over Fujian from January to April and from October to December (1981—2011), an index of frost injury in Fujian is determined, by combining the lowest ground surface temperature, weather phenomena, and lowest temperature. Frost injury is defined by any one of these three conditions as follows: the lowest ground surface temperature is lower than or equal to 0 °C; frost or freezing is found on the ground surface; and the lowest temperature is lower than or equal to 2 °C.

The climatic characteristics are investigated and discussed. The basic conclusions are as follows: (1) The annual average number of frost injury days, the first and last frost injury date, and the number of frost injury-free days in Fujian demonstrate obvious regional differences, with northeast—southwest-trending contours that correlate well with meteorological station elevations. The whole province of Fujian is divided into three frost injury regions. The western and northern regions and high elevation mountain area belong to region I, where frost injury occurs easily, begins earlier, ends later, and there are fewer frost injury-free days. Region III encompasses hilly landscapes in coastal areas, seldom effected by frost injury. The regional averages of the first and last frost injury date in regions I and II, respectively, show delayed and advanced trends, while the number of frost injury-free days increase. (2) Frost injury over most areas of Fujian with short duration is uncommon, and its occurrence frequency becomes lower and lower. (3) By comparison of frost injury with different intensity, it shows that the stronger frost injury takes more widespread damage, occurs later, and finishes earlier, with less number of frost injury days.

The circulation background leading to frost injury in Fujian is also discussed, based on NCEP/NCAR four-times-daily reanalysis data during the same period. It is found that the meridional circulation increases at the level of 500 hPa, the line of 568 dagpm goes through the south of Zhejiang Province, and the upper cold center intensity at -36 °C stays behind the East Asian trough, with strong cold advection. The line of 0 °C on the 850 hPa layer moves southwards close to Fujian Province. On the surface layer, most areas of East China are controlled by cold high pressure at 1 029 hPa. In this circulation background, the weather is relatively fine in Fujian, but then the temperature plummets owing to surface radiation at night, so frost injury occurs easily. Through analysis of the circulation characteristics at 0800 BT on the day of beginning and the next day of ending with different frost injury intensity, it is found that the position of the index lines, such as the lines of 568 dagpm (500 hPa), 0 °C (850 hPa), 1 025 hPa (surface layer) and so on, is closely related to the frost injury intensity. Frost injury strengthens gradually along with the index lines moving southward, and vice versa. The index lines move less significantly in the period from medium-strength to high-strength, as compared to during the period from low-strength to medium-strength.

frost injury index; frost injury date; frost injury-free days; statistical climate characteristics; circulation background

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20141117003

(责任编辑: 孙宁)