



秦俊灵,沈瑞珊,李琛,等. 沧州地区春霜冻特征及短期预报方法的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2024(7):43-48.

沧州地区春霜冻特征及短期预报方法的研究

秦俊灵,沈瑞珊,李琛,石新丽,张唯

(沧州市气象局,河北 沧州 061000)

摘要:为提早做出春霜冻预判以减少对农作物的危害,利用 2016—2023 年沧州市春季气象资料,采用皮尔逊相关系数、TS 评分等方法,对沧州市春霜冻特征和预报指标进行了统计分析及检验。结果表明,沧州市春霜冻发生在 3 月至 4 月,结束日期主要在 3 月下旬—4 月上旬,多发生在晴朗、软风、低湿的天气背景下,空间上呈西多东少的特征。以单因素最低气温判定春霜冻是否发生时,多年平均差值(最低气温与最低地温)并非是最优指标,大多数气象观测站表现为前者低于后者。在日最低气温相同的情况下,天气状况和湿度是影响霜冻形成的关键因素,天气越晴好,湿度越小,越容易形成霜冻。加入天气状况和湿度因素后,以最优指标预报春霜冻时全区 TS 较单因素时提高了 7% 左右。检验证明,根据最低气温、天气状况、湿度,采用最优指标查表法预报春霜冻的预报效果更好,比普通查表法更适合应用在沧州市春霜冻预报中。

关键词:春霜冻;预报最优指标;天气状况;湿度;查表法

霜冻是指土壤表面或植株表面的温度下降到足以使农作物遭受冻害甚至死亡的一种天气现象^[1]。从南到北、从东到西我国各地霜冻现象都时有发生,发生范围广、危害作物种类多^[2-4]。近年来,国内外学者对霜冻也做了许多研究。王岱等^[5]基于均一化的气象站点资料,发现中国各区霜冻日数呈减少趋势,一些学者的研究^[6-9]也证实了我国多数区域初霜冻日期推迟,终霜冻日期提前,无霜冻日数延长的结论。焦文慧等^[10]通过 R/S 分析法计算时间序列的 Hurst 指数,定性地推测华北地区终霜日在未来将继续呈提前的趋势。其他有关霜冻的研究大多基于对农业的危害^[11-13]、灾害指标^[14-17]、风险评估^[18-20]。而对于霜冻的预报方法的研究较少,杨晓玲等^[21]采用 Press 准则和逐步回归进行预报因子精选和最低地温预报方程的建立,再采用 CSC 双评分准则确定最低地温预报全局最优的显著性方程。周彬等^[22]、周成龙等^[23]根据最低气温及风速、云量预报,采用查表法分别对无锡和新疆地区的霜冻做出预报,并取得良好的效果。

众多学者对华北地区霜冻的研究,都获得了一定的成果^[24-26],但有关霜冻预报的研究却鲜有涉及。沧州地区在霜冻过往研究中,也发现春季发生霜冻要比秋季对农业的危害更为严重^[27]。鉴于此,本研究将利用沧州市气象局多年地面观测资料,在充分考虑天气状况、风速和湿度对其影响的情况下,对沧州市春霜冻特征和预报指标进

行了统计分析及检验,以掌握该地区春霜冻的发生规律,提早做出春霜冻预判,并制定相应的农业措施,以减少春霜冻对该地区农作物的危害,为沧州市农业服务提供一定的科学依据。

1 资料与方法

气象要素数据来自于河北省沧州市气象局 14 个气象观测站,地温、气温、风速、湿度的观测采用仪器自动观测,天气状况的观测采用人工观测。选取 2016—2022 年 3 月—5 月气象资料用于统计分析,2023 年 3 月—4 月气象资料用于预报检验。当日最低气温和最低地温选取时段为前一日 20:00 时后至当日 20:00 时前,当日天气状况选取时段为当日 00:00 时至当日 8:00 时前,当日风速选取 2:00 时的 2 min 平均风速,当日湿度选取前一日 20:00 时至当日 20:00 时前的最小相对湿度。

以最低地温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 为出现霜冻的判断标准。采用皮尔逊相关系数反映两组序列的相关性关系。采用 TS 评分来判定预报效果,TS、空报率(FAR)、漏报率(PO)计算公式分别为:

$$TS = \frac{T_z}{T_z + T_K + T_L} \quad (1)$$

$$FAR = \frac{T_K}{T_z + T_K} \quad (2)$$

$$PO = \frac{T_L}{T_z + T_L} \quad (3)$$

式中, T_z 为正确天数; T_K 为空报天数; T_L 为漏报天数。

收稿日期:2024-01-09

基金项目:沧州市气象局科研开发项目(22CZ13)。

第一作者:秦俊灵(1989—),女,学士,工程师,从事农业气象研究。E-mail:1005647511@qq.com。

通信作者:张唯(1983—),女,学士,高级工程师,从事中短期天气预报及服务研究。E-mail:dounai36448@163.com。

2 结果与分析

2.1 特征分析

2.1.1 空间分布特征 从沧州市春霜冻出现例数的空间分布(图 1)可以看出,近 7 年来,沧州市春霜冻全区平均出现 116 例,年平均 17 例。在空

间上,春霜冻出现例数大体上呈西多东少的特征,高值区出现在西部县市的肃宁、河间,为 128~134 例,低值区出现在东部县市的黄骅、盐山,为 101 例。

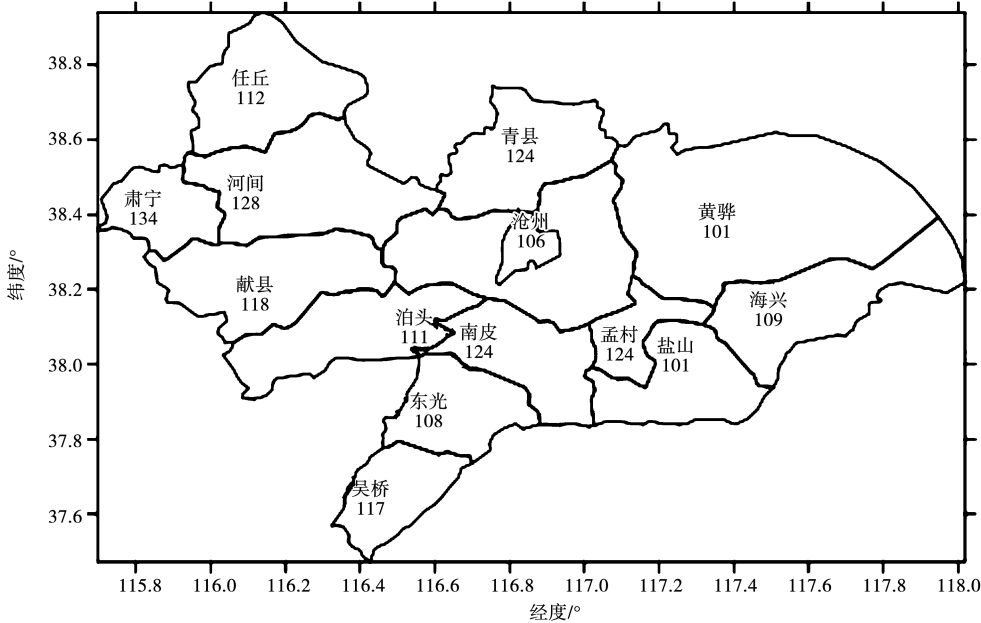


图 1 2016—2022 年沧州市春霜冻发生例数的空间分布

2.1.2 月分布特征 从表 1 可以看出,沧州市春霜冻出现在 3 月—4 月,主要发生在 3 月份,占总春霜冻例数的 90.8%,出现频次达 15.0 例·a⁻¹。春霜冻出现频次大体上随时间推迟而明显减少。对沧州市大田作物冬小麦和经济林果造成影响的主要时间段是 3 月下旬至 4 月,占总春霜冻例数的 28.1%。其中 3 月下旬出现频次为 3.1 例·a⁻¹,

4 月上、中、下旬分别为 1.1,0.1 和 0.3 例·a⁻¹,4 月中旬出现霜冻概率最低。从终霜冻月旬分布来看,近 7 年来,沧州市春霜冻结束日期主要出现在 3 月下旬至 4 月上旬,占比达 63.2%,其中 4 月上旬出现次数最多,出现频次为 4.1 例·(10 a)⁻¹。春霜冻结束日期最早出现在 3 月中旬,在 3 月 14 日,最晚结束日期为 4 月下旬,在 4 月 23 日。

表 1 2016—2022 年沧州市春霜冻和终霜冻月旬分布情况

项目		3 月上旬	3 月中旬	3 月下旬	4 月上旬	4 月中旬	4 月下旬
春霜冻	占比/%	45.2	26.7	18.9	6.9	0.7	1.6
	频次/(例·a ⁻¹)	7.5	4.4	3.1	1.1	0.1	0.3
终霜冻	占比/%	0.0	12.2	22.4	40.8	10.2	14.3
	频次/[例·(10 a) ⁻¹]	0.0	1.2	2.2	4.1	1.0	1.4

2.1.3 天气背景特征 从表 2 可以看出,晴朗天气下发生春霜冻的次数最多,达总春霜冻次数的 68.5%,其次是多云天气,占比为 21.6%,有雨天气下,春霜冻出现最少,仅占 3.6%。从风力情况来看,春霜冻均发生在风力≤3 级的天气下,且以 1~2 级风力为主,占比达 83.4%,说明沧州市只

有在微风天气及以下才会发生春霜冻。从湿度情况来看,春霜冻发生时,最小相对湿度≤20%的天气居多,达到 58.6%,其次是相对湿度在 20%~30%时,占比 18.0%,而>40%以上的仅占 9.0%。因此,沧州市发生春霜冻的天气背景多为晴朗、微风、低湿天气。

表 2 2016—2022 年沧州市出现春霜冻的天气背景情况

项目	天气状况				风力				最小相对湿度			
	晴	多云	阴	雨	0 级 (静风)	1 级 (微风)	2 级 (轻风)	3 级 (微风)	≤20%	20%~30%	30%~40%	>40%
占比/%	68.5	21.6	6.3	3.6	3.7	44.0	39.4	12.8	58.6	18.0	14.4	9.0

2.2 预报探讨

霜冻预报即为地面最低温度的预报,然而目前对最低地温的预报产品较少且不够成熟,但对最低气温、湿度、风力、天气状况等常规预报项目,已经有了系统且比较成熟的方法,预报准确率比较高,因此霜冻预报的关键是对最低气温与最低地温差值的预报。经研究发现用常规的线性方程和多元方程拟合误差较大,采用前人研究的查表法预报霜冻相对简单而准确,因此在前人研究基础上,来探讨最适合沧州本地的春霜冻预报临界值指标。

2.2.1 最低地温与最低气温 图 2 是泊头站最低地温与最低气温关系情况,可以看出两者呈明显正相关关系,皮尔逊相关系数为 0.938 的极显著性检验,且两者极显著正相关($P<0.01$),即最低气温越低最低地温就越低。因此,当最低地温 $\leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最低气温 $\leq T_i$, T_i 可以作为最低气温判定是否会出现春霜冻的预报指标。以往采用查表法预报霜冻时,经常将最低气温与最低地温的多年平均差值(以下简称为差值),作为判定春霜冻是否会出现的预报指标。

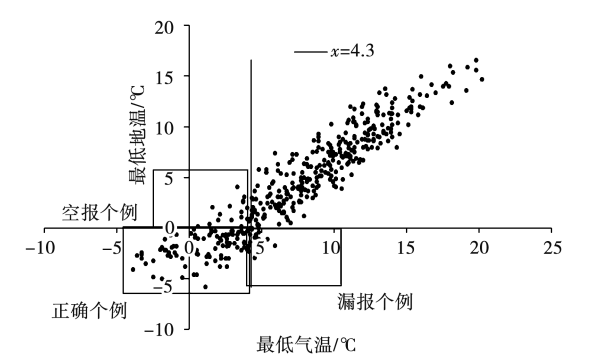


图 2 2016—2022 年泊头站最低地温和最低气温关系情况

表 3 2016—2022 年沧州市 14 个气象观测站差值及对应 TS 和最优 TS 及最优指标情况

项目		泊头	任丘	河间	青县	沧州	献县	黄骅	肃宁	盐山	海兴	孟村	东光	吴桥	南皮	全区
差值/ $^{\circ}\text{C}$		3.0	3.1	1.9	2.7	2.0	2.5	2.6	2.7	1.9	1.5	1.9	3.0	2.7	2.2	1.5~3.1
TS 评分/ $\%$	TS	67	67	71	80	71	69	74	69	68	74	79	61	70	76	71
	PO	29	25	22	15	18	23	22	22	27	16	16	33	24	15	22
	FAR	8	13	11	7	16	13	7	15	10	14	6	13	10	13	11
最优指标/ $^{\circ}\text{C}$		4.3	4.2	2.5	2.7	1.5	3.4	2.9	4.2	3.6	1.2	2.2	4.2	3.2	2.8	1.2~4.3
TS 评分/ $\%$	TS	76	79	76	80	75	78	80	75	71	78	84	76	76	78	77
	PO	10	8	13	15	20	5	13	4	7	18	10	9	11	7	11
	FAR	17	15	15	7	8	19	9	23	25	5	7	18	16	17	15

2.2.2 天气状况、湿度、风速对霜冻的影响 影响霜冻的气象要素关键是最低气温,然而在最低气温相同的情况下,天气状况、湿度、风速可能会

如图 2 所示,当赋予 T_i 一个数值时,如 $T_i=4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,可以获得样本中该指标下霜冻预报正确、漏报、空报的个例数,进而根据 TS 评分,计算获得该指标的 TS、PO、FAR 值。当 TS 最高或 TS 相等、PO、FAR 最低时,对应的最低气温称为预报春霜冻的最优指标。统计近 7 年来沧州市 14 个气象观测站最低气温与最低地温的平均差值和对应的 TS 评分,还有最优 TS 评分和最优指标情况,结果详见表 3。

由表 3 可知,近 7 年来沧州市 14 个气象观测站间多年平均差值差异明显,范围在 $1.5\sim 3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,以差值作为判定春霜冻是否发生的预报指标时,全区 TS 为 71%,单站 TS 波动较大,范围在 $61\%\sim 80\%$ 之间。而最优全区 TS 可达 77%,较以差值作为预报指标时要高 6%,单站 TS 在 $71\%\sim 84\%$ 之间,波动性减弱,说明以差值作为预报指标的预报效果和稳定性都不是最优的。最优 TS 评分下,判定春霜冻发生的最优指标,大多数气象观测站较差值偏高 $0.3\sim 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,少数气象观测站如沧州、海兴偏低 $0.3\sim 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从 PO 和 FAR 来看,以差值作为预报指标时,大多数气象观测站表现为 PO 较 FAR 明显偏高,以任丘站为例,PO 为 25%,FAR 为 13%;少数气象观测站如沧州、海兴表现为 PO 和 FAR 相当,以沧州为例,分别为 18%和 16%。而最优 TS 评分下,大多数气象观测站 PO 明显降低,FAR 略微升高,以任丘为例,PO 降到 8%,FAR 升到 15%;少数气象观测站如沧州、海兴相反,PO 略微升高、FAR 明显降低,以沧州为例,PO 升到 20%,FAR 降到 8%。说明当差值的 PO(FAR)较高时,可以通过增长(降低)临界值,来提升 TS 评分,进而寻找到预报效果好的最优指标,来作为预报春霜冻的指标。

影响最低气温与最低地温的差值。对近 7 年来沧州市 14 个气象观测站在不同天气状况、湿度、风速下的最低气温与最低地温差值情况进行分析,

由表 4 可知,相同天气状况下,各站间差值有所差异,但均表现为差值大小与天气状况有关,天气越晴好,差值越大。以泊头站为例,当天气为晴时,差值平均值可达 3.4℃,而当天气转差为阴雨时,差值平均值仅有 2.6℃。除了天气状况外,湿度也是影响差值的一个重要因子,湿度越小,差值越大,且湿度对差值的影响还要大于天气状况对其的影响。以泊头为例,在湿度≤20%时,差值高达

3.7℃,而在湿度>40%时差值只有 1.9℃。研究还发现,风速大小对差值的影响并未有明显规律性,有些站表现为随风速增大,差值减小,如任丘,风速≤1 m·s⁻¹时,差值平均值为 3.4℃,当风速>3 m·s⁻¹时,差值为 2.6℃;有些站正相反,如河间,风速≤1 m·s⁻¹时,差值平均值为 1.4℃,当风速>3 m·s⁻¹时,差值为 2.2℃。

表 4 2016—2022 年沧州市 14 个气象观测站在不同天气状况、湿度、风速下的差值情况

项目		泊头	任丘	河间	青县	沧州	献县	黄骅	肃宁	盐山	海兴	孟村	东光	吴桥	南皮
不同天气状况下的差值/℃	晴	3.4	3.7	2.2	3.1	2.3	2.9	2.9	3.0	2.3	1.7	2.2	3.6	3.0	2.7
	多云	2.7	2.6	1.6	2.4	1.8	2.4	2.4	2.3	1.7	1.4	1.7	2.6	2.5	1.9
	阴	2.6	2.5	1.5	1.9	1.3	1.8	2.3	2.1	1.2	0.9	1.1	2.3	2.2	1.3
	雨	2.6	2.0	1.2	1.4	1.0	1.2	1.4	2.0	1.1	0.9	1.1	1.5	1.4	1.3
不同湿度下的差值/℃	≤20%	3.7	3.9	2.3	3.4	2.4	3	3.3	3.3	2.8	2.0	2.6	3.8	3.3	2.9
	20%~30%	2.9	2.9	1.6	2.6	1.8	2.4	2.6	2.4	1.7	1.5	1.7	3.0	2.7	2.0
	30%~40%	2.4	2.0	1.6	2.0	1.6	2.1	2.1	2.2	1.4	1.3	1.4	2.8	2.7	2.0
	>40%	1.9	1.5	1.2	1.1	1.2	1.5	1.4	1.6	1.1	0.6	1.0	1.8	1.7	1.1
不同风速下的差值/℃	≤1 m·s ⁻¹	3.3	3.4	1.4	2.4	1.0	2	2.3	2.8	1.8	1	1.8	3.7	2.5	2.0
	1~3 m·s ⁻¹	2.9	3.1	2.0	2.7	2.1	2.5	2.6	2.7	2.0	1.4	1.8	3.0	2.7	2.2
	>3 m·s ⁻¹	3.0	2.6	2.2	2.8	2.6	2.9	2.6	2.1	1.8	1.7	2.1	2.3	2.9	2.1

采用皮尔逊相关系数(表 5)对天气状况、湿度、风速和最低气温与最低地温间差值的相关性进一步分析也发现,虽然三者均与差值呈负相关,皮尔逊相关系数分别为-0.181,-0.427 和-0.075,但仅有天气状况和湿度的相关系数通过了 $P<0.01$ 的极显著性检验,这也进一步说明,对沧州而言,在日最低气温相同的情况下,天气状况和湿度是影响霜冻形成的主要关键因素。

表 5 天气状况、湿度、风速和最低气温与最低地温差值间的皮尔逊相关系数情况

项目	天气状况	湿度	风速
皮尔逊相关系数	-0.181**	-0.427**	-0.075

注:**表示通过显著性 0.01 检验。

2.2.3 不同天气背景下的预报最优指标 由上述分析可知,天气状况和湿度确实会影响最低气温与最低地温的差值。因此,在选取判定春霜冻的最优指标时,要考虑到天气状况和湿度对最优指标的影响。根据春霜冻出现天气背景情况和不同天气背景下的差值情况,将天气背景按晴、非晴、低湿、高湿分为四类,第一类为晴天低湿,即晴天且湿度≤30%;第二类为晴天高湿,即晴天且湿度>30%;第三类为非晴低湿,即多云或阴雨且湿度≤30%;第四类为非晴高湿,即多云或阴雨且湿度>30%。在四类天气背景下,分别对近 7 年来沧州市 14 个气象观测站的最优 TS 评分和最低气温预报春霜冻的最优指标进行分析统计,结果详见表 6。

表 6 2016—2022 年沧州市 14 个气象观测站在四类天气背景下的最优 TS 和最优指标

类别		泊头	任丘	河间	青县	沧州	献县	黄骅	肃宁	盐山	海兴	孟村	东光	吴桥	南皮	全区
最优指标/℃	晴天低湿	4.5	4.6	3.6	3.5	3.7	3.3	3.0	4.3	3.6	3.3	2.4	4.6	3.8	3.1	3.7
	晴天高湿	3.6	2.5	2.3	2.7	2.1	2.0	2.0	2.2	2.5	1.2	2.1	3.4	3.2	3.0	2.5
	非晴低湿	3.4	3.7	2.1	2.8	1.6	2.4	2.8	3.4	2.7	1.2	2.1	2.5	2.8	2.3	2.6
	非晴高湿	0.5	1.0	1.0	1.0	1.5	1.0	1.7	1.3	2.0	1.2	1.8	1.5	2.6	1.6	1.4
TS 评分/%	TS	84	85	84	85	82	86	85	83	84	83	89	82	85	84	84
	PO	12	7	7	7	5	7	6	3	8	8	5	7	6	7	7
	FAR	6	10	10	9	14	8	10	15	10	11	6	12	10	10	10

由表 6 可知,四类天气背景下各站间最优指标存在明显差异,大小均表现为:晴天低湿>晴天高湿或非晴低湿>非晴高湿,其中大多数站晴天高湿与非晴低湿相接近。以泊头为例,四类天气下最优指标分别为 4.5,3.6,3.4 和 0.5℃。从预报效果来看,加入天气状况和湿度因素后的最优指标,预报春霜冻的最优 TS 有了明显提高,单站最优 TS 在 82%~89%,较单因素时有所提高。7 年来 14 个气象观测站全区 TS 也达到了 84%,PO 和 FAR 分别为 7%和 10%,较单因素预报时分别提高了 7%、降低了 4%和 5%,预报效果明显优于单因素时。这也说明根据天气状况和湿度将天气分四类来预报春霜冻的方式,确实能有效提高春霜冻的预报效果。

2.3 预报检验

预报最低地温 $T_{\min_{\text{sur}}} = T_{\min_{\text{air}}} - T_{\text{ys}}$,其中 $T_{\min_{\text{air}}}$ 为最低气温, T_{ys} 为天气状况和湿度的综合影响因子。当 $T_{\min_{\text{sur}}} \leq 0$ 时,预报将出现霜冻,因此霜冻预报的指标为 $T_{\min_{\text{air}}} \leq T_{\text{ys}}$ 。当 T_{ys} 采用最优指标查表(表 6)时,称为最优指标查表法;而当 $T_{\text{ys}} = (T_y + T_s)/2$, T_y 和 T_s 分别是天气状况和湿度的影响因子, T_y 和 T_s 采用差值查表(表 4)时,即为前人研究的差值查表法,称为普通查表法。利用 2023 年 3 月—4 月气象资料,分别对最优指标查表法和普通查表法进行霜冻预报检验。

结果发现,2023 年 3 月—4 月沧州市 14 个气象观测站共出现春霜冻 148 例。采用最优指标查表法预报准确的有 136 例,漏报 12 例,空报 14 例,TS=84%,漏报率为 8%,空报率为 9%。采用普通查表法预报准确的有 121 例,漏报 27 例,空报 7 例,TS=78%,漏报率为 18%,空报率为 6%。虽然普通查表法空报率较低,但由于漏报明显偏高,最终导致 TS 较最优指标偏低 6%,所以最优指标查表法的预报效果要优于普通查表法。

3 讨论

沧州市春霜冻多发生在晴朗、软风、低湿的天气背景下,这与周彬等^[22]、周成龙等^[23]的研究结果一致。但是,在探寻影响霜冻的关键气象要素时,本研究发现在日最低气温相同的情况下,影响沧州地区霜冻形成的关键气象要素是天气状况和湿度,这一结论与周彬等^[22]、周成龙等^[23]关键气象要素是天气状况和风速的结果有差异。这说明影响霜冻形成的关键气象要素是有一定地域差异

的,在借鉴外地预报经验时,必须要做本地化检验与订正。

研究还发现,以单因素最低气温判定春霜冻是否发生时,最低气温与最低地温的多年平均差值并非是最优预报指标,为了获得更好的预报效果,本研究在充分总结前人霜冻预报方面研究成果的基础上,对前人采用的普通查表法进行了改进。改进后根据最低气温、天气状况、湿度,采用最优指标查表法预报春霜冻的效果更好,比普通查表法更适合应用在沧州市春霜冻预报中。

改进后春霜冻预报准确率虽然有所提高,但是春霜冻的发生条件是复杂的,不仅与天气状况、湿度、最低气温等气象要素相关,也与地形、作物、农事管理措施有关。因此,今后在霜冻预报研究过程中,在本研究基于气象要素的基础上,可以进一步考虑就某区域某农作物、某林果进行更精细化的研究。并且在实践应用中还可以进一步结合与农业相关的研究,探讨如何科学地调整种植制度、作物布局与品种布局,充分利用农业气候资源,以更好地趋利避害,减少春霜冻灾害带来的损失。

4 结论

2016—2022 年沧州市春霜冻全区平均出现 116 例,年平均 17 例,在空间上大体呈西多东少的特征。沧州市春霜冻发生在 3 月至 4 月,其中 3 月占比达 90.8%;结束日期主要出现在 3 月下旬至 4 月上旬,频次达 6.3 例·(10 a)⁻¹。沧州市春霜冻多发生在晴朗、软风、低湿的天气背景下。以单因素最低气温判定春霜冻是否发生时,最低气温与最低地温的多年平均差值并非是最优预报指标,且全区 TS 较最优偏低 6%;最优 TS 评分下的最优指标,大多数站较多年平均差值偏高 0.3~1.7℃。

在日最低气温相同的情况下,天气状况和湿度是主要影响霜冻形成的关键因素,天气越晴好,湿度越小,差值越大,越容易形成霜冻。不同天气背景下,最优指标大小表现为:晴天低湿>晴天高湿或非晴低湿>非晴高湿。加入天气状况和湿度因素后的最优指标,春霜冻预报时全区 TS 可达到 84%,较单因素时提高了 7%。检验证明,根据最低气温、天气状况、湿度,采用最优指标查表法预报春霜冻的预报效果更好,比普通查表法更适合应用在沧州市春霜冻预报中。

参考文献:

- [1] 秦俊灵,魏秀梅,索春男. 1972—2021 年沧州市霜冻灾害变化及其对农业的影响[J]. 陕西气象, 2023(4): 46-50.
- [2] 任义方,王培娟,钱半吨,等. 江苏省不同风险区域春茶霜冻害特征分析[J]. 中国农业气象, 2023, 44(9): 820-833.
- [3] 霍治国,李美萱,张海燕,等. 中国冬小麦霜冻灾害研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(6): 16-31.
- [4] 陈翔,林涛,林非非,等. 黄淮麦区小麦倒春寒危害机理及防控措施研究进展[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 243-250.
- [5] 王岱,游庆龙,江志红,等. 基于均一化资料的中国极端地面气温变化分析[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1352-1363.
- [6] 丁善文,王峰. 鲁中地区初霜日、终霜日及无霜期变化特征分析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(6): 73-77.
- [7] 钟洋洋,钱诚. 中国地区春霜冻的变化趋势和未来情景预估[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 50-62.
- [8] 朱永宁,冯东溥,李红英,等. 宁夏春霜冻期最低气温和霜冻日数时空变化特征[J]. 干旱气象, 2020, 38(2): 256-262.
- [9] 许学莲,王发科,曾国云,等. 气候变暖下柴达木盆地晚霜冻变化特征分析[J]. 青海农林科技, 2021(2): 61-65.
- [10] 焦文慧,张勃,马彬,等. 近 58 年华北地区初、终霜日及无霜期变化特征分析[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 343-352.
- [11] 程瑛,吴晶,李红,等. 1961—2017 年甘肃省霜冻演变特征及其对农业的影响[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 37-46.
- [12] 徐蕊,杨建玲,刘静,等. 宁夏枸杞生长季气候资源和主要气象灾害变化趋势及影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1645-1656.
- [13] 陶瑶,杨爱萍,段里成,等. 2018 年春霜冻对江西省北部茶叶生产影响的定量评估[J]. 气象与减灾研究, 2019, 42(1): 70-74.
- [14] 李淑祺,包佳婧. 河套地区苹果梨花期霜冻气象灾害指标研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35(12): 119-124.
- [15] 刘红,杨爱琴,孙智辉,等. 陕西苹果花期霜冻敏感性指标研究[J]. 陕西气象, 2022(4): 67-69.
- [16] 梁小娟,张晓煜,杨永娥,等. 宁夏 2 个桃品种开花坐果期霜冻指标试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 227-235.
- [17] 张祖莲,王命全,张山清,等. 基于多源数据的北疆春季霜冻指标检验及其应用[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(5): 86-92.
- [18] 邱星霖,林泽全,李臻,等. 不同气候变化情景下中国北方苹果花期霜冻风险研究[J]. 中国农业气象, 2024, 45(1): 33-44.
- [19] 吉春容,火勋国,谷然,等. 新疆雪梨花期霜冻灾害风险评估模型构建及适用性[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(6): 83-88.
- [20] 张波,孙思思,丁立国,等. 贵州春茶霜冻害危险性分析及区划[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(5): 99-105.
- [21] 杨晓玲,郭丽梅,丁文魁. 武威市霜冻气候特征及预报[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 612-616.
- [22] 周彬,刘端阳,夏健. 无锡地区霜冻特征及短期预报方法的研究[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 97-103.
- [23] 周成龙,钟昕洁,孙怀琴,等. 库尔勒市霜冻特征及其驱动力分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12(3): 82-86.
- [24] 李芬,于文金,张建新,等. 山西近 50a 初霜冻的气候变化特征及其周期分析[J]. 大气科学学报, 2012, 35(6): 754-761.
- [25] 钱锦霞,张霞,张建新,等. 近 40 年山西省初终霜日的变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 801-808.
- [26] 李春强,杜毅光,李保国,等. 河北省近四十年(1965—2005)气温和降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 1-7.
- [27] 秦俊灵,吕武洁,杨天禧. 沧州地区霜冻灾害变化特征及其趋势预测[J]. 气象与减灾研究, 2022, 45(4): 292-299.

Characteristics of Spring Frost in Cangzhou and Its Short-Term Forecasting Method

QIN Junling, SHEN Ruishan, LI Chen, SHI Xinli, ZHANG Wei

(Cangzhou Meteorological Bureau, Cangzhou 061000, China)

Abstract: In order to make early prediction of spring frost to reduce the damage to crops. Based on the spring meteorological data from 2016 to 2016 in Cangzhou, the characteristics and forecast indexes of spring frost in Cangzhou City were analyzed and tested by using the methods of Pearson product-moment correlation coefficient and TS scores. The results showed that spring frost in Cangzhou City occurred in March and April, the end date was mainly in late march-early April, mostly occurred in sunny, soft wind, low humid weather background, space was more west and less east characteristics. The multi-year mean difference (minimum air temperature and minimum ground temperature) was not the best index when the single factor minimum air temperature was used to judge whether spring frost occurs or not. At the same daily minimum temperature, weather conditions and humidity were the key factors affecting the formation of frost, the better the weather, the lower the humidity, the easier the formation of frost. After adding weather conditions and humidity factors, the TS of spring frost forecast by the best index increased about 7% than that of single factor forecast. The result shows that it is better to use the optimal index look-up table method to forecast spring frost according to the lowest temperature, weather condition and humidity.

Keywords: spring frost; optimal index of forecast; weather conditions; humidity; look-up table method