

杨凯,陈彬彬,陈惠,等. 福建省台湾青枣寒害综合气候指标与等级划分. 应用气象学报,2020,31(4):427-434.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200405

福建省台湾青枣寒害综合气候指标与等级划分

杨 凯¹⁾²⁾ 陈彬彬¹⁾²⁾ 陈 惠^{1)2)*} 陈福梓³⁾ 杨锡琼⁴⁾
李丽容³⁾ 李丽纯²⁾ 林 晶¹⁾²⁾

¹⁾(福建省灾害天气重点实验室,福州 350001)

²⁾(福建省气象科学研究所,福州 350001)

³⁾(福建省漳州市热带作物气象试验站,漳州 363001)

⁴⁾(福建省漳州市气象局,漳州 363001)

摘 要

通过专家走访和寒害灾情调查,建立福建省台湾青枣寒害受害症状分级标准。基于果园定位观测、地理移置试验和冬季寒害灾情调查得到的 2004—2016 年 32 个寒害实例,采用主成分分析和 K-means 聚类分析方法,研究了福建省台湾青枣寒害综合气候指标及其等级划分。结果表明:台湾青枣寒害临界气温为 5.0℃,其致灾因子包括过程极端最低气温(X_1)、小于等于 5.0℃低温持续日数(X_2)、小于等于 5.0℃过程有害积寒(X_3)、小于等于 5.0℃过程降温幅度(X_4),对各因子归一化处理,构建台湾青枣寒害综合气候指标(I_h),寒害等级包括:轻度, $0.02 \leq I_h < 0.72$;中度, $0.72 \leq I_h < 1.76$;重度, $1.76 \leq I_h < 2.72$;严重, $I_h \geq 2.72$ 。通过典型年对比印证,建立的福建省台湾青枣寒害综合气候等级指标与实际发生的寒害情况吻合较好,研究结果可供台湾青枣的寒害评估、引种、扩种参考。

关键词: 台湾青枣; 致灾因子; 主成分分析; K-means 聚类分析; 综合气候指标

引 言

福建、广东、广西、海南等省区地处热带、亚热带,水热资源丰富,具有种植台湾青枣、莲雾等新兴热带果树的优越气候条件。近年来,台湾青枣(*Zizyphus mauritiana* Lam.)因早结丰产、种植效益高^[1-2],得到广泛的引种扩种,种植面积和产量迅速增加。但这些地区属热带果树种植北缘地带,冬季低温常给青枣生产造成不同程度的损失,而且在全球增暖趋势的背景下,北半球区域性极端低温事件频繁发生^[3-4],增加了青枣遭受寒害的几率。同时在果树引种、扩种过程中,部分果农不遵循气候规律,在不适宜区盲目引种,加重了冬季台湾青枣寒害损失,严重影响台湾青枣产业的健康稳定发展^[5-7]。因此,开展台湾青枣冬季低温灾害监测预警,对该区域

台湾青枣生产的防灾减灾和可持续发展等具有重要意义。

目前研究果树低温寒害指标的方法很多。唐力生等^[8-9]、熊弦子等^[10]采用人工控制试验对果苗进行低温胁迫,分析果苗受害症状和生理生化指标,确定果苗的低温寒害等级指标,但指标主要在人工气候室模拟低温条件下获得。有学者针对冬季极端最低气温单一因子,对果树遭受不同等级寒害的极端低温阈值进行划分,但未考虑低温强度、低温持续时间等影响果树受害程度的因子,无法判定不同程度寒害过程对果树的影响^[11-15]。曾有研究以香蕉、荔枝、枇杷等果树的寒害过程为研究对象,分析寒害临界气温和致灾因子,构建果树的寒害综合气候指标^[16-20],但针对近年来引种的新特优热带果树的寒害综合气候指标研究较少,导致农业防寒措施存在不足。此外,寒害指标等级分级的制订存在差异,缺

2020-01-14 收到,2020-03-23 收到再改稿。

资助项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY2014060627),福建省自然科学基金项目(2018J01047),福建省科技厅农业引导性(重点)项目(2017N0011),福建省引导性(重点)项目(2015Y0046)

* 通信作者,邮箱: ch775@126.com

乏统一标准,不利于各地寒害监测预警发布和灾情上报评估。因此,本文基于福建省自然条件下台湾青枣低温寒害过程,以寒害调查实例中每个低温过程为研究对象,确定台湾青枣寒害临界气温,通过分析寒害实例的致灾因子,构建福建省台湾青枣寒害综合气候指标,采用聚类分析方法使寒害指标等级分级更加精细化,以期为当地农业生产部门制定适宜的引种扩种、防灾减灾决策提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据

2000—2014年福建省各县(市)台湾青枣产量数据,来源于历年《福建省农村统计年鉴》;2000—2016年冬季(12月—次年2月)福建省地面气象观测站逐日平均气温、逐日最低气温数据由福建省气象信息中心提供;台湾青枣寒害灾情样本所对应的极端最低气温由青枣果园内自动气象站或邻近的区域自动气象站数据订正获得。

1.2 方法

1.2.1 灾情数据收集

本研究主要通过田间调查、走访专家和果农、文献收集、果园定位观测、地理移置试验等方法收集灾情数据。根据灾情调查和试验需要,分别设计《台湾青枣寒害灾情调查表》和《台湾青枣寒害记录表》,灾情调查表主要记录调查地点台湾青枣受灾时间、详细灾情说明及灾后果树枝、干、叶变化,寒害记录表要求试验观测人员详细记录果树叶片和叶柄变色情况、枯叶和落叶情况、枯枝和主干受冻情况等。灾情数据获取后,汇总建立台湾青枣灾情样本集。

1.2.2 野外果园定位观测

自2014年10月起,在福建省台湾青枣的平行观测点和易灾果园(表1),各布设1套小气候自动观测系统(北京雨根RR-9140型和HOBO U12型),获取气温、湿度、降水、光合有效辐射数据,用于果树的寒害监测;并在其中的6个观测点分别安装红外自动夜视监测仪(夜鹰SG-008型),设置每日07:00(北京时,下同)至19:00,每隔10 min自动拍照记录台湾青枣

表1 福建省台湾青枣野外观测点地理位置
Table 1 Location of Taiwan green jujube field observations in Fujian

类型	观测点	地理位置	海拔高度/m	树龄/a
平行观测点	南安市农科所	24.92°N,118.35°E	199.2	5
	南靖县高港村	24.67°N,117.35°E	810.0	1
易灾果园	南靖县船场棚内	24.50°N,117.17°E	152.7	15
	南靖县船场棚外	24.50°N,117.16°E	152.7	15
	南靖县五川村	24.49°N,117.44°E	26.0	15
	长泰县陈巷镇	24.66°N,117.79°E	13.0	8
	平和县山格镇	24.42°N,117.39°E	29.4	10

果树、果苗生长发育状况,了解其形态变化。

1.2.3 地理移置试验

目前各地引种的台湾青枣优质品种主要为“脆蜜”,因此,试验采用盆栽方式培育“脆蜜”果苗,并从中筛选健壮植株进行地理移置。试验主要在福建省开展,为了获得台湾青枣遭受寒害后最准确的气象

数据,根据福建省历史年极端最低气温平均值的分布规律,本试验分别于2014年10月底和2015年10月底,提前将“脆蜜”果苗3~4盆分别安放在7个县气象局观测场附近、漳州市天宝农试站和南靖县高港村试验点(表2),安排试验人员管理果苗,并要求在冬季出现冷空气过程时,按照《台湾青枣寒害

表2 地理移置试验点信息
Table 2 Information of geographical transplantation experiments

试验点	地理位置	海拔高度/m	年极端最低气温平均值/℃
福鼎市气象局	27.20°N,120.12°E	36.2	-1.9
永泰县气象局	25.87°N,118.94°E	85.6	-1.2
罗源县气象局	26.50°N,119.55°E	60.5	-0.1
长泰县气象局	24.63°N,117.76°E	43.0	2.1

续表 2

试验点	地理位置	海拔高度/m	年极端最低气温平均值/℃
平和县气象局	24.23°N, 117.18°E	108.5	1.0
龙海市气象局	24.43°N, 117.83°E	32.1	3.1
云霄县气象局	23.96°N, 117.34°E	22.8	3.7
南靖县高港村	24.50°N, 117.16°E	810.0	-3.0
漳州市天宝农试站	24.63°N, 117.52°E	44.0	1.3

记录表》逐日记录果树寒害受害症状并拍照。

1.3 过程有害积寒的计算

本文采用文献[16-17]提出的过程有害积寒概念,作为台湾青枣寒害过程中的重要气象因子进行分析。过程有害积寒是指果树在低温过程中逐时低于临界受害气温的累积值,其计算公式可表示为

$$X = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^N (T_c - T_{min}) / (T_m - T_{min}) \quad (1)$$

式(1)中, X 为过程有害积寒(单位:℃·d), N 为低温过程持续日数(单位:d), T_c 为寒害临界气温(单位:℃), T_{min} 为日最低气温(单位:℃), T_{min} ≤ T_c, T_m 为日平均气温(单位:℃)。

1.4 致灾因子归一化

导致台湾青枣寒害的致灾因子较多,为了增强数据可比性,对各致灾因子进行归一化处理^[21-24]。对于青枣寒害等级呈正相关的因子采用正向因子归一化(式(2)),呈负相关的因子采用负向因子归一化(式(3))。

正向因子归一化

$$y_i = (x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min}) \quad (2)$$

负向因子归一化

$$y_i = (x_{max} - x_i) / (x_{max} - x_{min}) \quad (3)$$

其中, y_i 为归一化后的致灾因子值, x_{min} 和 x_{max} 分别为因子 x_i 最小值和最大值。处理后的归一化致灾因子最小值为 0, 最大值为 1, 其与原数值相比, 只是数字形式的变换, 将因子处理成量纲为 1, 保留了因子的统计学和生物学意义^[25]。

2 结果分析

2.1 寒害临界气温的确定

2.1.1 寒害受害症状分级标准的确定

为了分析福建省台湾青枣在遭受寒害后的灾情轻重,通过文献查阅、专家咨询和灾情调查分析,结合冬季各试验点和调查点台湾青枣遭受寒害后树体的形态变化和受害情况,根据树体的叶片、果实、枝条、主干受害程度进行分级,设轻度、中度、重度和严重 4 级,受害症状分级标准见表 3。

表 3 福建省台湾青枣寒害受害症状分级标准

Table 3 Classification standard of cold damage symptoms for Taiwan green jujube in Fujian

寒害等级	果实变化	叶片变化	枝条变化	主干变化
轻度	果皮变色、果肉不变色	嫩叶卷曲	枝条无变化	无变化
中度	果皮、果肉均变色,果实受冻率不大于 20%	外围叶片出现卷曲	末端嫩梢受冻干枯,次级枝梢无冻伤	无变化
重度	果皮、果肉均变色,果实受冻率大于 20%	树体中上部及外围叶片卷曲、干枯、脱落	外围枝条受冻干枯,主枝部分冻伤	无变化
严重	受冻率为 100%,烂果	叶片全部干枯、脱落	枝条、主枝均褐变、干枯	部分主干形成层褐变、植株死亡

2.1.2 寒害临界气温的确定

通过文献收集、冬季寒害灾情调查、走访种植大户等方法,获取历史灾情样本。结合 2014 年 12 月—2015 年 2 月、2015 年 12 月—2016 年 2 月冬季果园定位观测、地理移置试验结果,整理分析试验观测数据、拍照记录、观测人员记录资料及相关气象数据,可得到有明确时间、地点、台湾青枣受害症状、过程极端低温等寒害有效样本共 33 例,其中出现寒害症状的实例 32 个,无症状的实例 1 个(表 4)。对照

台湾青枣寒害受害症状分级标准,确定 32 例灾情样本寒害等级,每个寒害实例包括寒害等级和对应的当时当地极端最低气温。

由表 4 可知,台湾青枣在 5.4℃ 未出现寒害症状,当气温降至 4.8℃ 时,青枣出现轻度寒害。为了指标在监测预警中应用方便,确定 5.0℃ 为台湾青枣寒害的临界气温,即当最低气温小于等于 5.0℃ 时,青枣寒害过程开始。

表 4 福建省台湾青枣野外观测和地理移置试验结果

Table 4 Field observation and geographical displacement experiment results of Taiwan green jujube in Fujian

极低温出现日期	观测地点	极端最低气温/℃	果树受害症状	受害症状指标等级
2004-01-25	平和县小溪镇	0.9	青枣受害,部分植株叶片枯死	中~重度
2009-01-11	平和县山格镇	-1.0	果实受冻品质差,主要表现在果皮受冻,内部纤维化,受灾 70%	重度
2010-12-16	平和县山格镇	-1.8	果实受冻品质差,主要表现在果皮受冻,内部纤维化,受灾 50%,结合 2011 年 3 月 3 日调查照片,青枣烂果严重超过 20%,叶片失水卷曲、变黄	重度
2010-12-17	平和县小溪镇	-0.4	露天栽培的台湾青枣出现冻果、烂果,叶片卷曲	重度
2011-12-24	平和县山格镇	0.6	果实受冻品质差,主要表现在果皮受冻,内部纤维化,受灾 40%	中~重度
2014-12-05	南靖县高港村	4.1	部分叶片出现斑点,与前期相比叶片颜色变黄。	轻度
2014-12-17	长泰县气象局	4.8	果苗幼果变色,叶片未变色	轻度
2014-12-18	永泰县气象局	1.8	青枣部分幼果萎蔫,轻微变色	中度
2014-12-18	平和县山格镇	0.6	部分幼果受冻变色,脱水	中度
2014-12-22	南靖县高港村	-2.6	果苗 50% 以上叶片变色,幼果受冻变色。	重度
2014-12-22	南安市农科所	3.6	幼果受冻变色,叶片未变色	轻度
2015-01-02	罗源县气象局	1.5	青枣幼果变色萎蔫	中度
2015-01-23	南靖县高港村	-3.1	果苗死亡	严重
2015-02-13	平和县山格镇	1.4	果实接近成熟期,叶片变色	中度
2015-12-18	南靖县高港村	-1.9	果苗幼果变色萎蔫,叶片变黄 100%	重度
2015-12-18	南靖县船场棚内	3.3	果树叶片少量变黄、卷曲	轻度
2015-12-18	南靖县船场棚外	2.1	果苗幼果变色萎蔫,叶片变黄约 50%	中度
2015-12-18	永泰县气象局	2.4	果苗幼果变色萎蔫,少量叶片变黄	轻度
2015-12-18	福鼎市气象局	0.2	果苗幼果变色萎蔫,叶片变黄 50%、脱水卷曲	中度
2015-12-18	长泰县气象局	5.4	无症状	无
2016-01-25	长泰县气象局	0	青枣果苗果实变黄、核褐变 100%,叶片变色萎蔫	重度
2016-01-25	永泰县气象局	-2.2	果苗幼果变色萎蔫,叶片脱水卷曲、变黄 70% 以上;果树脱水卷曲、变色 50% 以上	重度
2016-01-25	平和县气象局	-1.4	果苗幼果变色萎蔫,叶片变黄 100%	重度
2016-01-25	福鼎市气象局	-4.2	果苗地上部分枯死	严重
2016-01-25	南靖县船场棚外	-3.1	棚外青枣顶部枝条、叶片全部干枯,烂果严重,已找不到正常的果实,剩余的零星果实小,产量损失严重,整树叶片干枯达 60%~80%	严重
2016-01-25	南靖县船场棚内	-2.3	棚内青枣顶部叶片萎蔫 10%~30%,烂果 5%~10%,小果较多,预计产量损失达 50%	重度
2016-01-25	南靖县五川村	-0.2	棚外果苗叶片萎蔫 100%	重度
2016-01-25	南靖县气象局	-0.7	叶片变色、卷曲 80% 以上	重度
2016-01-25	平和县气象局	-1.4	果苗叶片变色、脱水 100%	严重
2016-01-25	平和县山格镇	-3.0	棚外叶片干枯 30%~50%,末次梢受冻干枯,烂果 20% 左右,果实偏小;棚内受害程度明显较轻,叶片局部干枯萎蔫,枝条未受害	重度
2016-01-25	云霄县路边	1.7	青枣顶部叶片变色 30%	中度
2016-01-25	南靖县高港村	-6.8	青枣果苗全部冻死	严重
2016-02-07	长泰县青枣园	2.6	果实、叶片、枝条轻度受冻,部分叶片受冻干枯,比例约为 5%~10%	轻度

2.2 台湾青枣寒害致灾因子的确定

由于 32 个寒害实例多发生在台湾青枣果园和野外观测点,部分实例为历史灾情数据,收集的气象因子中仅气温的数据完整,降水、日照等其他气象因子均有缺失,因此,本文主要分析了寒害过程降温幅度(日最低气温降温幅度)、过程有害积寒(寒害过程

气温累积值)、过程极端最低气温、过程持续日数等以气温为主的气象因子。通过对各因子与寒害实例灾情等级进行相关分析,结果表明:过程极端最低气温(X_1)、小于等于 5.0℃ 低温持续日数(X_2)、日最低气温小于等于 5.0℃ 的过程有害积寒(X_3)、小于等于 5.0℃ 过程降温幅度(X_4)与灾情等级均为极显

著相关关系,其中 X_1 与灾情等级为负相关,其他因子为正相关(表5),4个气象因子与灾情等级的相关

表 5 气象因子与寒害实例灾情等级的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between meteorological factors and disaster level of cold damage examples

致灾因子	相关系数
X_1	-0.928
X_2	0.594
X_3	0.755
X_4	0.758

表 6 致灾因子间的相关系数矩阵

Table 6 Correlation coefficient matrix among disaster-inducing factors

致灾因子	X_1	X_2	X_3	X_4
X_1	1			
X_2	-0.528	1		
X_3	-0.854	0.637	1	
X_4	-0.775	0.649	0.814	1

文中对各致灾因子进行归一化处理,运用 SPSS 统计软件中的主成分分析工具,对归一化后的台湾青枣寒害 4 个致灾因子 X_1, X_2, X_3, X_4 序列进行分析,软件提取了第 1 主成分,其累计方差贡献率达到 78.5%,说明这一主成分已能充分说明数据间的波动原因,并得到协方差矩阵的特征值 $\lambda = (3.142, 0.513, 0.213, 0.133)$ 。将各主成分载荷向量除以各主成分特征值的算术平方根,可得到各主成分系数分别为 -1.255, 1.688, 0.53 和 2.52。

由此可构建台湾青枣寒害综合气候指标(I_h)为

$$I_h = -1.255X_1 + 1.688X_2 + 0.53X_3 + 2.52X_4 \quad (4)$$

由式(4)可知,寒害综合气候指标 I_h 与冬季极端最低气温 X_1 呈负相关关系,而与其他 3 个致灾因子呈正相关关系,即冬季极端最低气温越低,小于等于 5.0℃低温持续日数越多,小于等于 5.0℃有害积寒越大,小于等于 5.0℃寒害过程降温幅度越大,则寒害综合气候指标 I_h 越大,台湾青枣遭受的寒害等级就越高,这与果树实际发生的寒害过程相符。

2.4 台湾青枣寒害综合气候指标分级

K-means 聚类分析是经典的基于划分聚类算法,在气象数据分析和农业气象灾害等级划分等方面得到应用^[26-29]。本文采用 SPSS 统计软件中的 K-means 聚类分析工具,对 32 个灾情样本的寒害等级和对应的寒害综合气候指标进行分析,获取各寒害等级对应的 I_h 阈值。研究中选择寒害综合气候

系数均达到 0.01 显著性水平。故选取这 4 个气象因子作为台湾青枣寒害的致灾因子。选取的 4 个致灾因子是基于福建省台湾青枣主产区灾情样本分析的结果,因此,选取的致灾因子具有一定代表性。

2.3 台湾青枣寒害综合气候指标的计算

计算致灾因子间的相关性,4 个致灾因子相关显著,均达到 0.01 显著性水平(表 6),说明 4 个致灾因子并不独立,互有影响。因此,本文采用主成分分析方法对 4 个致灾因子进行综合简化并构建公式。

指标作为聚类分析的变量,寒害等级作为标识变量,聚类数为 4 类,初始类中心由系统指定方式确定。结果表明:4 个类中心点经过 2 次迭代后,得到最终各聚类中心分别为 0.02, 0.72, 1.76, 2.72(表 7)。由此可知,台湾青枣的轻度、中度、重度、严重寒害综合气候指标分级分别为 $0.02 \leq I_h < 0.72, 0.72 \leq I_h < 1.76, 1.76 \leq I_h < 2.72, I_h \geq 2.72$ 。

表 7 聚类分析最终类中心

Table 7 Final class center of cluster analysis

类中心	寒害等级	I_h
1	轻度	0.02
2	中度	0.72
3	重度	1.76
4	严重	2.72

2.5 典型年对比印证

平和县和南靖县的台湾青枣产量占福建省产量的 82% 以上,具有一定的代表性,故选取台湾青枣主产区平和县和南靖县进行对比印证。由图 1 可以看到,平和县台湾青枣寒害综合气候指标在 1999 年、2004 年、2008 年、2013 年的冬季(12 月一次年 2 月)数值较大,说明台湾青枣在这些年份遭受了较大的寒害,其中 1999 年、2008 年冬季台湾青枣寒害达到了重度等级。经过相关文献查询,1999 年 12 月 21—26 日平和县受强冷空气影响气温急速下降,此次冷空气强度大,持续时间长,县城所在地小溪镇气温为 -2.9℃,芦溪镇等地降至 -7.0℃,为近 40 年来所罕见,台湾青枣遭受严重寒害,经济损失很大;

2005年1月1—3日平和县、南靖县、长泰县、华安县热带果树(香蕉、青枣、芒果、番木瓜、杨桃等)遭受重度寒害,产量损失约为50%;2009年1月10—18日平和县、南靖县、华安县热带优良水果遭受重度寒害,产量损失约为40%^[6-7,30];2014年1月19—24日平和县极端最低气温达到了 0.3°C ,作者曾对该过程造成的平和县青枣寒害进行调查,调查显示平

和县郊区露天栽培的青枣幼果受冻变色、脱水,叶片出现卷曲变色,属于中度寒害受害症状特征,而当年冬季寒害综合气候指标值为1.45,按分级标准为中度寒害等级,两者相符。上述对比表明:台湾青枣寒害综合气候指标及其分级与实际发生的寒害情况较吻合,验证了指标的可靠性,即可用本文的寒害综合气候指标分析福建省台湾青枣遭受寒害的程度。

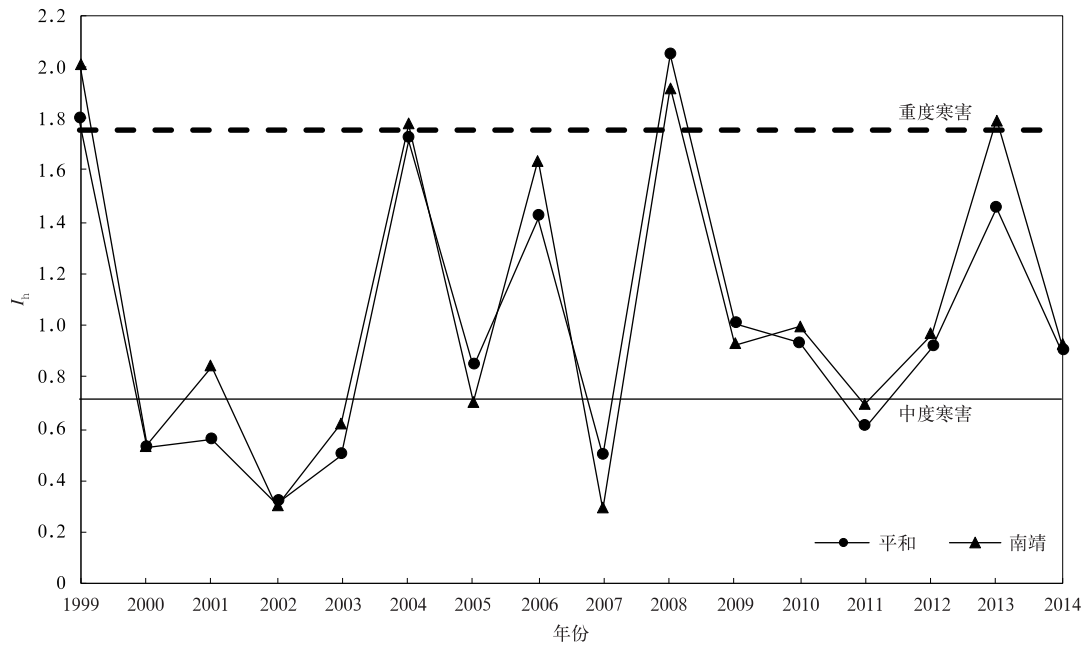


图1 福建省平和县和南靖县台湾青枣寒害综合气候指标逐年变化

Fig. 1 Comprehensive climatic index of cold damage of Taiwan green jujube at Pinghe and Nanjing in Fujian

3 结论与讨论

本文以自然条件下福建省台湾青枣的低温寒害过程为研究对象,并针对32个寒害调查实例中每个过程进行分析,基于过程有害积寒、过程最大降温幅度等致灾因子构建了新的寒害综合气候指标,得到如下结论:

1) 本文综合果树灾害调查、地理移置试验、果园定点观测等多种方法确定台湾青枣寒害临界气温为 5.0°C ,即当最低气温小于等于 5.0°C 时,寒害过程开始;当最低气温大于 5.0°C 时,寒害过程结束。

2) 确定过程极端最低气温、过程有害积寒、过程持续日数和过程最大降温幅度为台湾青枣寒害的4个致灾因子,因子间相关明显。通过对4个致灾因子进行归一化处理,并综合简化所得到的寒害综

合气候指标,物理意义清晰,且第1主成分累计方差贡献率达到78.5%。

3) 采用K-means聚类分析方法,结合寒害等级,确定台湾青枣的轻度、中度、重度、严重寒害综合气候指标分级分别为 $0.02 \leq I_h < 0.72$, $0.72 \leq I_h < 1.76$, $1.76 \leq I_h < 2.72$, $I_h \geq 2.72$ 。通过对平和县台湾青枣寒害综合气候等级指标与历史实际发生的寒害情况进行对比,结果较为吻合,验证了指标的可靠性和实用性。

影响果树寒害的因子很复杂,其发生及程度还受植物学因子的影响^[31-33],由于未对台湾青枣遭受寒害后的植物生理指标进行测定,受数据限制,本文只针对影响果树寒害重要的气象因子气温进行了分析,如何结合阴雨、大风、日照等其他因子设计寒害指标研究的试验,并得到寒害预警评估业务的综合性指标,还有待今后进一步研究。

参考文献

- [1] 刘代兴. 台湾青枣品种、丰产栽培及云南种植区划. 热带农业科技, 2003, 36(2): 6-10.
- [2] 陈家金, 王加义, 黄川容, 等. 福建省引种台湾青枣的寒冻害风险分析与区划. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1537-1544.
- [3] 龚志强, 王晓娟, 崔冬林, 等. 区域性极端低温事件的识别及其变化特征. 应用气象学报, 2012, 23(2): 195-204.
- [4] 李清泉, 孙丞虎, 袁媛, 等. 近20年我国气候监测诊断业务技术的主要进展. 应用气象学报, 2013, 24(6): 666-676.
- [5] 黄育宗, 黄绿林, 周福龙, 等. 福建平和果树冻害调查. 亚热带植物通讯, 2000, 29(3): 34-38.
- [6] 徐宗焕, 陈家金, 林俩法, 等. GIS在漳州青枣低温害分析中的应用. 广西气象, 2005, 26(增刊I): 12-13.
- [7] 郑小琴. 闽南地区毛叶枣低温伤害分析. 福建果树, 2006(1): 33-34.
- [8] 唐力生, 王华, 胡飞, 等. 低温胁迫下芒果苗的受害症状及生理响应. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2627-2636.
- [9] 唐力生, 胡飞, 王华. 低温对台湾青枣 (*Zizyphus mauritiana* Lam.) 苗期形态的影响. 生态学杂志, 2016, 35(4): 864-870.
- [10] 熊弦子, 唐力生, 王华. 莲雾苗低温危害等级划分标准初探. 中国农业气象, 2016, 37(6): 700-710.
- [11] 王春林, 刘锦奎, 周国逸, 等. 基于GIS技术的广东荔枝寒害监测预警研究. 应用气象学报, 2003, 14(4): 487-495.
- [12] 林日暖, 崔巧娟, 朱正心. 广东经济林果寒害地面预警强信号和长期统计预报模式的研究. 应用气象学报, 2003, 14(4): 499-501.
- [13] 谭宗琨, 刘世业, 唐志鹏, 等. 香蕉寒冻害等级指标及灾损指标的初步研究. 自然灾害学报, 2013, 22(4): 182-192.
- [14] 陈惠, 杨凯, 李丽纯, 等. 莲雾寒冻害低温等级指标的确定. 生态学杂志, 2017, 36(4): 1047-1052.
- [15] 李政, 苏永秀, 王莹, 等. 芒果寒(冻)害等级划分及低温指标确定. 灾害学, 2017, 32(3): 18-22; 56.
- [16] 杜尧东, 李春梅, 毛慧琴. 广东省香蕉与荔枝寒害致灾因子和综合气候指标研究. 生态学杂志, 2006, 25(2): 225-230.
- [17] 柏秦凤. 华南寒害致灾气候因子及综合指数研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2008: 4-5.
- [18] 李娜, 霍治国, 贺楠, 等. 华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1244-1251.
- [19] 李娜. 华南寒害气候风险区划技术研究. 北京: 中国气象科学研究院, 2010: 3-5.
- [20] 杨凯, 林晶, 陈惠, 等. 福建枇杷低温害临界温度和综合气候指标. 中国农业气象, 2013, 34(3): 468-473.
- [21] 闵晶晶, 孙景荣, 刘还珠, 等. 一种改进的BP算法及在降水预报中的应用. 应用气象学报, 2010, 21(1): 55-62.
- [22] 陈家金, 李丽纯, 林晶, 等. 福建省枇杷气象灾害综合风险评估. 应用气象学报, 2014, 25(2): 232-241.
- [23] 何斌. 陕西省农业干旱风险评估方法研究. 西安: 西安理工大学, 2017: 20-21.
- [24] 王永利, 侯琼, 苗百岭, 等. 内蒙古马铃薯干旱风险区划. 应用气象学报, 2017, 28(4): 504-512.
- [25] 李登科, 权文婷, 谢飞舟. 陕西省小麦条锈病气象预报模型. 干旱气象, 2017, 35(1): 128-133.
- [26] 刘静, 马力文, 张晓煜, 等. 春小麦干热风灾害监测指标与损失评估模型方法探讨——以宁夏引黄灌区为例. 应用气象学报, 2004, 15(2): 217-225.
- [27] 张洪兵, 贾来喜, 李璐. SPSS宝典. 北京: 电子工业出版社, 2007: 353-364.
- [28] 任义方, 赵艳霞, 王春乙. 河南省冬小麦干旱保险风险评估与区划. 应用气象学报, 2011, 22(5): 537-548.
- [29] 刘瑞娜, 杨天明, 陈鹏, 等. 安徽省油菜花期连阴雨灾害损失评估指标. 中国农业气象, 2016, 37(4): 471-478.
- [30] 杨忠义, 陈晖津. 台湾青枣低产原因分析及丰产栽培技术. 福建热作科技, 2003, 28(4): 27-28.
- [31] 陈由强, 叶冰莹, 高一平, 等. 低温胁迫下枇杷幼叶细胞内Ca²⁺水平及细胞超微结构变化的研究. 武汉植物学研究, 2000, 18(2): 138-142.
- [32] 冯美利. 杧果叶片组织的细胞结构与性的初步研究. 热带农业科技, 2003, 26(1): 5-7.
- [33] 胡春霞, 王丽, 汤杰. 低温对南果梨的生理生化指标的影响. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(3): 349-352.

Comprehensive Climatic Index and Grade Classification of Cold Damage for Taiwan Green Jujube in Fujian

Yang Kai¹⁾²⁾ Chen Binbin¹⁾²⁾ Chen Hui¹⁾²⁾ Chen Fuzi³⁾ Yang Xiqiong⁴⁾
Li Lirong³⁾ Li Lichun¹⁾²⁾ Lin Jing¹⁾²⁾

¹⁾ (Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001)

²⁾ (Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001)

³⁾ (Zhangzhou Meteorological Experiment Station of Tropical Crops, Fujian, Zhangzhou 363001)

⁴⁾ (Zhangzhou Meteorological Bureau of Fujian, Zhangzhou 363001)

Abstract

Taiwan green jujube is widely planted in Fujian, Guangdong, Guangxi and Hainan because of its high planting efficiency. However, these areas locate in the northern edge of planting areas of tropical fruit trees, therefore blindly planting may aggravate the loss of cold damage. In order to achieve a reasonable distribution and reduce the loss of cold damage, it is urgent to establish objective and quantitative comprehensive climatic index for cold damage of Taiwan green jujube in these areas.

The classification standard of cold damage symptoms is established by interview of experts and field disaster investigation. According to field observation and results of geographical transplantation experiment, combined with the investigation of cold damage from December 2014 to February 2015 and December 2015 to February 2016, 32 samples of cold damage are obtained, and the critical temperature of cold damage for Taiwan green jujube is determined to be 5.0°C . Referring to each process of the cold damage examples, the disaster grade of each cold damage example is obtained by comparing the classification standard of cold damage symptoms, and the correlation between meteorological factors and disaster grade is analyzed. The disaster-inducing factors for cold damage of Taiwan green jujube are determined, including the extreme minimum temperature, sustained days of cold damage process with the temperature below 5.0°C , the process of harmful cold accumulation for the extreme minimum daily temperature below 5.0°C , and the cooling range of cold damage process for the temperature below 5.0°C . After normalizing each factor, principal component analysis is used to simplify four disaster-inducing factors, and the comprehensive climatic index of cold damage for Taiwan green jujube is constructed. The formula is $I_h = -1.255X_1 + 1.688X_2 + 0.53X_3 + 2.52X_4$. K-means cluster analysis method is used to determine the index classification combined with the cold damage grade. The cold damage is graded with I_h as follows: $0.02 \leq I_h < 0.72$, light; $0.72 \leq I_h < 1.76$, moderate; $1.76 \leq I_h < 2.72$, severe; $I_h \geq 2.72$, most severe. According to the method of comparative validation for typical years, the comprehensive climatic grade index of cold damage for Taiwan green jujube is in good agreement with the actual situation, which verifies the reliability of the index. Results have practical reference value for the evaluation of cold damage, introduction and expansion of Taiwan green jujube.

Key words: Taiwan green jujube; disaster-inducing factors; principal component analysis; K-means clustering analysis; comprehensive climatic index