

# 中国主要果树气象灾害指标研究进展

柏秦凤<sup>1</sup>, 霍治国<sup>2,3\*</sup>, 王景红<sup>1</sup>, 张 勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710014; <sup>2</sup>中国气象科学研究院, 北京 100081;

<sup>3</sup>南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要:** 果树产业是我国广大农村农业经济收入的一项重要来源, 对提高当地人民生活水平, 促进当地农业经济发展具有重要意义。笔者采用分类归纳法, 对我国现有主要果树气象灾害指标进行分类总结和系统阐述。从果树气象灾害指标基本概念出发, 对果树气象灾害指标进行分类; 分北方和南方两大区域, 按照各自主要果树的气象灾害种类, 综述了我国目前已有果树气象灾害指标, 评述了各类指标的优缺点及适用性; 从指标构成、指标构建方法、涉及果树种类、产业发展需求、创新的技术方法等方面, 讨论了果树气象灾害指标研究存在的问题和未来发展方向, 以期为我国主要果树的品种布局、产业优化、防灾减灾等提供信息参考, 为我国果树产业健康、稳定、可持续发展提供科学保障。

**关键词:** 果树; 气象灾害; 指标

中图分类号: S66 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2019)09-1229-15

## Progress in research on meteorological disaster indicators of major fruit trees in China

BAI Qinfeng<sup>1</sup>, HUO Zhiguo<sup>2,3\*</sup>, WANG Jinghong<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crops, Xi'an 710014, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; <sup>3</sup>Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China)

**Abstract:** China is an important fruit-producing country in the world. In recent years, the fruit planting area in China increased significantly, and the total fruit output has also rapidly increased. In this context of development, the characteristic fruit industry has become an important source of rural agricultural economic income in China. The stable production of characteristic fruits and disaster prevention and mitigation are of great significance for improving people's living standards and promoting the development of agricultural economy. At the same time, China has a vast territory, spanning three main climatic zones from north to south, and the damage caused by meteorological disasters of fruit trees is extremely serious and frequent. Therefore, research on meteorological disasters of fruit trees is one of the hot topics in agrometeorological disasters research. Especially, the research on meteorological disaster indicator of economic fruit trees is particularly important, which is an inevitable link in disaster monitoring, early warning, defense, planting planning, risk zoning and other research. In this paper, the main meteorological disaster indicators of fruit trees in China are classified and systematically expounded, by using the method of classification and summary. In this paper, the basic concept and significance of meteorological disaster indicators of fruit trees are defined firstly, and then the research history and progress of meteorological disaster indicators of fruit trees in China are summarized. The main research methods of meteorological disaster indicator of fruit trees in China, including fruit trees and disaster types, technolo-

收稿日期: 2019-01-19 接受日期: 2019-06-12

基金项目: 重大自然灾害监测预警与防范重点专项(2017YFC1502801); 中国气象局2019年度国内外作物产量气象预报专项“全国苹果始花期预报技术研究”

作者简介: 柏秦凤, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事农业气象灾害研究。Tel: 029-81619505, E-mail: qinfeng333@163.com

\*通信作者 Author for correspondence. Tel: 010-68408953, E-mail: huozg@cma.gov.cn

gy level and main achievements, were summarized in two periods before and after the 21st century. On this basis, the existing meteorological disaster indicators of fruit trees in China are divided into three categories according to their construction methods: the empirical indicator construction method based on disaster verification and disaster investigation; the comprehensive indicator construction method based on the relationship between disaster-causing factors and yields; and the experimental construction method based on artificial climate chamber or artificial climate box. According to the composition types of meteorological disasters of fruit trees in China, the existing meteorological disasters indicators of fruit trees are divided into three categories: single factor indicators, multi-factor indicators and comprehensive indicators. According to the key meteorological factors causing meteorological disasters of fruit trees, the existing meteorological disasters indicators of fruit trees are divided into several categories: low temperature disaster indicators, high temperature disaster indicators, drought disaster indicators, rainstorm disaster indicators and so on. Secondly, aiming at the northern fruit trees, this paper summarizes the research on late frost damage indicator of apple, pear, apricot, plum and grape in spring, drought disaster indicators of apple and walnut, hot damage indicators of apple and kiwifruit in summer, rainstorm disaster indicator of apple and jujube in autumn, and freezing injury indicators of pear, apricot and jujube in winter. For southern fruit trees, it summarizes the research on high temperature damage indicator of citrus, and the research on freezing damage indicator of citrus, litchi, longan, mango and loquat in winter. At the same time, this paper summarizes the types, construction methods, uses, advantages and disadvantages of the above meteorological disaster indicators of fruit trees in agrometeorological service. Finally, this paper discusses the existing problems and the future development direction of the research on meteorological disaster indicators of fruit trees, from the aspects of indicator composition, indicator construction method, fruit tree species, industrial development needs, and new technology and methods. It is expected that the results of this study can provide reference for the distribution of main fruit trees, industrial optimization, disaster prevention and mitigation, and provide scientific guarantee for the healthy, stable and sustainable development of fruit tree growing industry in China.

**Key words:** Fruit tree; Meteorological disaster; Indicator

近年来,我国农业产业结构变化较快,其中最为突出的一点是,兼具食用价值与经济价值的果树栽植面积增速非常显著。截止2017年,中国果树栽植面积1 281.67万 $\text{hm}^2$ ,比“十二五”期初增加127.28万 $\text{hm}^2$ ,增长11.03%,年均增长1.62%<sup>[1]</sup>。另据国务院办公厅印发的《中国食物与营养发展纲要(2014—2020年)》预测,2020年我国果品人均消费量将达到60 kg,但仍较健康标准70 kg有很大差距<sup>[2]</sup>。果树气象灾害一直以来是影响我国果树产量稳定的主要因素之一,如2018年全国苹果产区发生大面积晚霜冻害,主栽苹果品种红富士减产幅度达到25%左右<sup>[3]</sup>。随着我国经济林果产业规模的扩大,气象灾害造成果树经济效益的不稳定性更多地受到政府、果农和相关研究人员的关注,促使了果树气象灾害研究逐渐成为近年来农业气象灾害研究的热点问题之一。

其中,有关果树气象灾害受灾指标的研究尤为重要,其是灾害监测、预警、防御、种植规划、风险区划等研究不可避免的环节。

国内外有关果树气象灾害的研究均始于上世纪后期<sup>[4]</sup>。国外有关果树气象灾害的研究涉及成灾机理研究比较多,有关具体灾害指标的研究鲜有报道<sup>[5-7]</sup>。我国有关果树气象灾害指标的研究最早可见于20世纪50年代的相关文献<sup>[4,8-10]</sup>;进入21世纪后,随着我国果树栽植面积的扩大,规模化栽植品种的增多,相关研究也相应增多,涉及的果树种类增加,涉及的灾害种类增多,并出现了人工气候箱、人工气候室等先进研究设备,在此基础上,有关我国果树气象灾害指标的研究成果逐渐丰富。

目前,我国有关主要果树气象灾害指标的研究,涉及灾害种类主要有低温类灾害、高温热害、干旱、

冰雹、阴雨灾害等;涉及果树种类已达20余种之多。相关研究成果为当前我国果树气象灾害监测、预警、防御等提供了重要参考。但现有相关研究在指标构建方法、指标构成类型等方面多样化,研究水平参差不齐;研究内容区域化,鲜有见到对种植范围较广的果树,如苹果等进行全国范围的灾害指标研究;相关果树指标研究的应用成果少见,科技转化水平较低,服务生产面较窄。笔者基于前人研究基础,按果树灾害种类,从指标构成类型、构建方法、优缺点与适用性分析等方面,对现有主要果树气象灾害指标进行梳理。在此基础上结合新时代的新技术、新方法、新需求等,探讨未来果树气象灾害指标研究的方向和重点,以期为我国果树产业品种布局、产业优化、防灾减灾等提供信息参考,为我国果树产业的健康、稳定、可持续发展提供科学保障。

## 1 概述

### 1.1 基本概念

果树气象学是研究气象条件对果树生长发育、果实品质与产量等的影响及规律的学科。属于农业气象学科分支。果树气象灾害是指在果树生长过程中,导致果树生长发育受抑制或死亡,使产量显著下降的不利天气气候条件的总称<sup>[4]</sup>。而果树气象灾害指标,则是导致果树发生气象灾害的不利天气气候因子的临界值。果树气象灾害指标研究,是果树气象学研究中的重要内容,主要研究极端或不稳定气象条件导致果树组织、器官等受害的临界点。果树气象灾害指标的研究,可为果树气象灾害监测、预警信息发布,灾害防御等提供重要指导作用;可为果树种植规划、品种布局、灾害区划和评估等提供参考依据。

### 1.2 研究概况

我国有关果树气象灾害指标的研究,大约始于20世纪50年代。这一时期,果树气象灾害指标研究的方法主要是果园观测、历史灾害印证和盆栽试验;所得果树气象灾害指标均由单一气象要素构成;涉及灾害以果树低温灾害为主,其他少见。如章恢志等<sup>[9]</sup>在20世纪50年代进行鄂东柑橘冻害调查后,总结了鄂东柑橘受冻的低温临界温度 $-5.0$ 、 $-7.2$ ℃等。陈尚谟等<sup>[8]</sup>基于果园观测和盆栽试验,研究了柑橘低温冻害发生的温度条件,结合果园观测,将柑橘低温冻害按照 $-5$ 、 $-7$ 、 $-9$ ℃,由轻到重划分为1级、2

级、3级。20世纪80年代末,陈尚谟等<sup>[4]</sup>,编著了我国第一本果树气象研究的专著《果树气象学》,书中对当时我国几种主要果树,柑橘、梨、苹果、桃等花期低温冻害、越冬期冻害等的指标进行了总结。进入21世纪后,随着我国果品产业规模扩大以及气候变化背景下灾害性天气的多发频发,我国果树气象灾害指标研究逐渐成为各果品生产大省农业气象研究人员的重点研究内容。如华南地区主要果树荔枝等的低温灾害研究,被列入国家“十一五”科技支撑计划重点项目,相关学者系统研究了荔枝等的低温灾害指标,气候危险性风险和综合风险的分布等<sup>[11-12]</sup>。又如以陕西为主的黄土高原苹果产区,“陕西省经济作物气象服务台”与“陕西省果业管理局”连续多年合作,对以苹果为主的陕西省多种主栽果树进行了多个主要灾种的气象灾害指标研究<sup>[13-16]</sup>。这一时期,果树气象灾害指标的研究方法逐渐增多,技术手段逐渐先进,增加了人工气候箱、人工气候室控制试验;果树气象灾害指标由单一气象要素构成向多气象要素和综合了一定数学方法的综合气象指标转变;低温灾害指标的研究依然是主要研究内容之一,果树高温热害、干旱等灾害的研究逐渐增多,也出现了一些高温干旱、低温阴雨等复合灾害指标的初步研究成果<sup>[17-21]</sup>。

### 1.3 果树气象灾害指标分类

果树气象灾害指标可按照指标构建方法划分为3类:一类是基于历史灾情印证和灾害实地调查的经验构建方法。如庞庭颐等<sup>[22]</sup>、匡昭敏等<sup>[23]</sup>,基于对广西地区龙眼、荔枝低温冻害的实地调查,并将龙眼、荔枝历史时期的冻害灾害资料和气象资料进行对比分析,建立了以果树植株受冻率和最低气温相互匹配的龙眼、荔枝4级低温冻害指标。第二类是基于致灾要素与产量等要素的统计分析,再结合数学方法构建综合指标的方法。如杨凯等<sup>[24]</sup>,通过对福建省莆田市枇杷园受害过程中,果园小气候实时观测数据的分析,初步确定导致枇杷树冬季受害的气象要素有极端最低气温、日最低气温 $\leq 3$ ℃有累积温值、 $\leq 3$ ℃低温日数、 $\leq 3$ ℃低温持续最大日数4项因子;再结合对近20年来莆田市枇杷气象产量与上述4项因子的相关关系分析,筛选通过显著性检验的因子,采用主成分分析方法进行综合简化,建立枇杷低温灾害综合气候指标。第三类是基于人工气候室、人工气候模拟箱、果园试验等的试验构建方法。

如王静等<sup>[20,25]</sup>,采用人工气候模拟箱,对宁夏主栽梨树、杏树、李子树的花期和幼果期冻害指标进行试验,获得上述果树花期和幼果期不同低温强度下,不同低温持续时间下的冻害等级指标。

果树气象灾害指标亦可按照指标组成类型划分为3类:单要素指标、多要素指标、综合类指标。单要素指标是由单一气象要素构成的果树受害临界指标,如柑橘越冬期,在最低气温降至-5~-7℃时,可能发生轻度冻害,降至-7~-9℃时,可能发生中度冻害,降至-9℃以下时,发生重度冻害<sup>[8,26]</sup>。该柑橘越冬期低温冻害指标由最低气温单一气象要素构成,即为单要素指标。多要素指标是由多个气象要素构成的果树受害临界指标,如早中熟富士系苹果花期,在遇到最低气温降至-2~-3℃,且-2℃以下持续4~6h,则花朵轻度受冻;在遇到最低气温降至-3~-4℃,且-3℃以下持续1~5h,则果花中度受冻;在遇到最低气温降至-4℃以下,且-4℃以下持续1h以上,则果花重度受冻。该指标由最低气温要素和持续时间要素共同构成,缺一不可,因而属于多要素指标<sup>[19]</sup>。果树气象灾害多要素指标,最少由2项要素构成,也可能由2项以上要素共同构成。果树气象灾害综合

指标,是采用一定的数学方法,对多项对灾害形成有贡献作用的气象和非气象要素,进行分析、组合而形成的一组指示果树气象灾害程度的指标。如杨爱萍等<sup>[27]</sup>基于江西省冬季极端最低气温、日最低气温低于-1.5℃的最长持续日数、前一年12月至当年1月降水距平、越冬期内最长持续降水日数4项要素,采用多元线性回归方法构建了柑橘越冬期单站低温冻害综合指标;并采用特尔菲法将指标由轻到重划分5个等级。

果树气象灾害指标,按照灾害的关键致灾气象要素,可分为低温类灾害指标、高温热害指标、干旱灾害指标、阴雨灾害指标等。果树低温灾害主要以最低气温等为关键致灾气象因子。果树低温灾害又可分为果树冻害、果树寒害;但热带、亚热带果树发生低温灾害时,有0℃以上的低温致灾作用,也有0℃以下受冻致灾作用,因此有关热带、亚热带果树低温灾害指标的文献中多出现“冻(寒)害”或“寒(冻)害”命名法<sup>[28-30]</sup>。果树高温热害主要以最高气温等为关键致灾气象因子;果树干旱灾害主要以不同时间尺度降水量等为关键致灾气象因子。果树常见气象灾害种类及其可能的关键致灾因子(表1)。

表1 果树气象灾害及其参考致灾因子

Table 1 Meteorological disasters of fruit trees and reference disaster-causing factors

常见果树气象灾害种类 Types of meteorological disasters of fruit trees	参考致灾因子及其单位 Reference disaster-causing factors and their units
冻害、寒害 Freezing injury, chilling injury	极端最低气温(℃)、日最低气温(℃)、负积温(℃)、低温持续时间(d或h) Extreme minimum temperature (°C), daily minimum temperature (°C), negative accumulated temperature (°C), low temperature duration(d or h)
热害 Heat damage	极端最高气温(℃)、日最高气温(℃)、高温持续时间(d或h) Extreme maximum temperature (°C), daily maximum temperature (°C), high temperature duration(d or h)
干旱 Drought	月、季度、年降水量(mm)、特定时段降水量(mm) Monthly, quarterly and annual precipitation (mm), precipitation in specific periods (mm)
阴雨灾害 Heavy rain disaster	累积降水量(mm)、持续降水日数(d) Cumulative precipitation (mm), Days of continuous precipitation (d)
冰雹 Hail	冰雹直径(mm)、冰雹持续时间(h)、冰雹日数(d) Hail diameter (mm), hail duration (h), hail days (d)
暴雨、洪涝 Rainstorms, floods	单日最大降水量(mm)、过程最大降水量(mm)、累积降水量(mm)、持续降水日数(d) Daily maximum precipitation (mm), process maximum precipitation (mm), cumulative precipitation (mm), days of continuous precipitation (d)
风灾 Windstorm	瞬时最大风速(m/s)、平均风速(m/s) Instantaneous maximum wind speed (m/s), average wind speed (m/s)
低温阴雨 Low temperature and rain disaster	日最低气温(℃)、日照时数(h)、累积降水量(mm) Daily minimum temperature (°C), sunshine hours (h), cumulative precipitation (mm)
高温干旱 High temperature and drought	日最高气温(℃)、降水量(mm)、持续无降水日数(d) Daily maximum temperature (°C), precipitation (mm), days without precipitation (d)



## 2 北方果树气象灾害指标研究

我国幅员辽阔,传统习惯上以秦岭为界划分为北方和南方。北方和南方气候差异大,主要果树种类及其主要气象灾害时空特征均显著不同。基于此,本文分北方和南方两大区域,按照各自主要果树从春季到冬季自然生长过程中,可能遇到的春季晚霜冻害、夏季干旱和高温灾害、秋季阴雨灾害、越冬期低温冻(寒)害的顺序,逐一进行归纳、总结和评述。

### 2.1 北方果树晚霜冻害指标

果树霜冻灾害是一种短时低温灾害,使正在生长期的植物组织发生伤害,其症状次日或冷空气过后即可呈现。春季晚霜冻害几乎对我国北方所有果树均有影响,目前研究成果可见到其对苹果、梨、杏、李子等几种北方主要果树的影响和危害,一般表现为果树花器冻伤,不能正常结实<sup>[31-32]</sup>。柴芊等<sup>[33]</sup>选择陕西省7个有代表性的苹果基地县,分析其近40年苹果花期冻害和气温的关系,采用典型K阶自回归方法建立陕西苹果花期冻害预测模型,在此基础上将花期冻害指数分成强、偏强、中等、偏弱、弱5个等级,并对模型进行预测检验,结果显示预测准确率为66.7%。该苹果花期冻害指数及预测方法,近年来一直应用于黄土高原地区富士系苹果春季花期冻害气象预测业务中,发挥了一定的防灾减灾作用。

王景红等<sup>[19,34]</sup>多年来一直对黄土高原地区苹果春季晚霜冻害指标进行研究,于2017年形成了主栽品种富士系的早中熟和晚熟苹果品种花期冻害等级指标的行业标准——富士系苹果花期冻害等级(QX/T392—2017)<sup>[35]</sup>。该指标体系中,不同冻害等级的指标信息包含了低温强度以及不同低温强度持续时间的致灾信息,指标经过验证与实际冻害发生等级基本吻合,在农业气象业务服务中应用价值高,可有效监测、预警、评估黄土高原地区富士系苹果花期冻害。

王静等<sup>[20,25]</sup>采用人工气候模拟箱,对宁夏3个主栽梨树品种、2个主栽杏树品种、3个主栽李子树品种,共8个品种果树的花期和幼果期冻害指标进行了试验。获得上述果树花期和幼果期,在不同低温强度下,不同低温持续时间下轻度、中度、重度冻害等级指标。陈丛敏等<sup>[36]</sup>采用高精度冰箱对巴旦杏3种主栽品种的花期霜冻进行了模拟试验,以-

4.0℃持续2h、-4.0℃持续4h、-6.0℃持续2h,初步划分了巴旦杏轻度、中度、重度冻害。刘伟等<sup>[37]</sup>采用人工气候箱模拟霜冻试验,建立了酿酒葡萄赤霞珠在春季萌芽、新梢、幼叶、花序4个不同生育时段,轻度霜冻灾害指标分别为-4、-2、-2、0~-1℃;新梢、花序2个生育时段中度霜冻灾害指标分别为-3、-2℃;萌芽、新梢、幼叶、花序4个不同生育时段,重度霜冻灾害指标分别为-5、-4、-3、-3℃。上述通过人工气候模拟箱或高精度冰箱试验得出的梨、杏、李子、葡萄低温冻害指标,包含了相关果树对低温敏感的生育期遭遇低温冻害的关键致灾因子的强度信息,或者不同强度低温的持续时间信息,所得指标在相关果树低温灾害监测、预警等业务应用中具有重要的参考意义,但上述指标有共同缺陷,均为试验指标,没有后期在实际中应用检验的结果,因而还需在相关果树春季冻害实际监测、预警等业务中进行检验和修订。

### 2.2 北方果树干旱灾害指标

干旱是指因水分收支或供求不平衡而形成的持续水分短缺现象。某区域在某一段时间内的降水量比其多年平均值显著偏少的气象干旱现象,是造成果树干旱灾害的直接原因<sup>[38]</sup>。

目前有关我国主要果树干旱灾害指标的研究相对较少,北方果树仅见针对黄土高原区域苹果、核桃干旱灾害的相关研究成果。王景红等<sup>[39]</sup>基于气象干旱指标降水距平百分率,对陕西富士系苹果、核桃的干旱灾害进行灾害等级划分,按照降水距平百分率(Pa), $Pa > -50\%$ 、 $-70\% < Pa \leq -50\%$ 、 $Pa \leq -70\%$ ,将苹果萌芽-幼果期(3—5月)、果实膨大期(6—8月)、着色一成熟期(9—10月)、越冬期(11月至次年2月)4个时段的干旱灾害划分为轻度、中度、重度干旱;将陕西核桃初夏(5—6月)干旱划分为轻度、中度、重度干旱。针对多年生果树,上述干旱灾害指标,仅考虑了固定时段内自然降水较常年的亏缺率,没有结合考虑果树不同生育期的需水量,因而在指标应用中与实际有一定差距。基于此,王景红等<sup>[13]</sup>综合考虑黄土高原苹果产区主要依靠自然降水,苹果全生育期不同区域降水的时空分布不均等实际特点,基于富士系苹果果树水分供需平衡原理,用“不同生育期苹果需水量”、“实际降水量”、“生育期总日数”、“生育期无降水日数”,4项因子构建了该区富士系苹果各主要生育期干旱指数见公式1。

$$Dr = \frac{\text{生育期需水量}}{\text{生育期降水量}} \times \frac{\text{无降水日数}}{\text{生育期日数}} \approx \frac{\text{无降水日数}}{\text{生育降水量}} \times k$$

(1)

式中:Dr为不同果区干旱指数;式中“苹果不同生育期需水量”、“生育期日数”两项指标相对稳定,可视为常数,因而用k代表他们的比值,则公式简化为右边部分。从式(1)可显而易见,苹果各生育期Dr越大,旱情越严重。上述干旱指标,前者具有监测、预警功能,但精度不足;后者结合了黄土高原气候特点与果树各生育期需水量建立,在黄土高原苹果产区进行历史时期苹果干旱的纵向对比评价,具有较好的适用性,但具有地域局限性。

### 2.3 北方果树高温灾害指标

气象学上将日最高气温 $\geq 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 定义为高温日。我国大部分果区年高温日在5d以上,其中东南部和西北部为年高温日数高值区,其次为江南局地和福建西北部,年高温日数可达35d左右<sup>[38]</sup>。我国北方地区,常遭遇高温灾害的果树主要有苹果、梨等。研究发现北方多种果树的适宜生长温度上限也是 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当日最高气温超过 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,会发生日灼灾害,造成果实品质下降<sup>[40-43]</sup>。另有部分果树在开花期遇到异常高温天气,会造成落花落果,如苹果、枸杞开花期适宜温度上限为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,当日最高气温达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可能造成严重落花<sup>[44-45]</sup>。

果树高温热害指标研究,目前北方果树中仅见针对苹果、梨等常见果树有相关研究成果。王景红等<sup>[39]</sup>基于陕西果区日最高气温单要素,将处于果实膨大期(6-7月)的陕西富士系苹果高温热害、梨高温热害,按照日最高气温( $T_g$ ), $35\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g < 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $38\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g < 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g$ ,划分为轻度、中度、重度高温热害;基于陕西核桃种植区日最高气温和高温持续时间,将核桃高温热害按照 $T_g \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3~4d)、 $T_g \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5~6d)、 $T_g \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (7d及以上),划分为轻度、中度、重度高温热害。刘璐等<sup>[42]</sup>在针对陕西关中地区海沃德猕猴桃开展气候品质评价时,基于日最高气温和高温持续时间,将海沃德猕猴桃高温日灼灾害,按照 $35\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g < 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (3~4d)、 $35\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g < 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5~8d)、 $35\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_g < 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (9d及以上)或 $T_g \geq 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2d及以上),划分为轻度、中度、重度灾害。上述基于日最高气温单要素建立的果树高温热害指标,指标简单,但具有一定的灾害监测、预警参考意义;基于日最高气温和高温持续时间建立的果树高温热害

指标,指标精度有所提高,不仅可应用于果实气候品质评价,也可应用于果树高温热害监测、预警、评估等。

刘璐等<sup>[17]</sup>依据苹果高温热害历史灾情数据和果园试验结果,对陕西省富士系苹果高温热害指标进行修订,构建了基于日最高气温( $T_g$ )、日平均相对湿度(Rh)、高温持续日数,3要素的苹果高温热害等级指标(表2)。该指标是在经验指标的基础上结合果园试验而建,要素涉及果园温度、湿度、高温持续时间,比较全面,指标准确度高,可很好应用于苹果高温热害监测、预警、评估等农业气象业务服务中;但业务应用的前提是建立果园小气候观测系统,取得果园实时温度、湿度等数据,或者建立果园小气候要素与附近气象台站对应气候要素之间的相关关系模型。

表 2 陕西富士系苹果高温热害指标

Table 2 Indicators of high temperature heat damage of Fuji Apple in Shaanxi province

高温热害等级 Grade	日最高气温 Daily maximum temperature/ $^{\circ}\text{C}$	日平均相对湿度 Daily average relative humidity/%	持续时间 Continuous days/d
轻度 Light	$T_g \geq 35$	$Rh \leq 50$	2
中度 Moderate	$T_g \geq 35$	$Rh \leq 40$	2
	$T_g \geq 35$	$Rh \leq 50$	3
重度 Severe	$T_g \geq 35$	$Rh \leq 50$	4
	$T_g \geq 35$	$Rh \leq 50$	5
	$T_g \geq 38$	$Rh \leq 50$	2
	$T_g \geq 40$	不作要求 Not required	不作要求 Not required

随着气候变化、极端天气事件的频繁发生,农业气象灾害也愈加复杂。近年来有关高温叠加干旱的复合灾害越来越引起农业气象研究者的关注。王景红等<sup>[39]</sup>基于灾害调查、历史灾情验证等方法,建立了陕南猕猴桃和柑橘高温干旱灾害指标(表3)。该指标综合了高温强度、高温持续时间、分析时段内降水量3项要素,指标简单实用,在气象灾害监测、预警业务中应用方便;但是指标要素之间权重影响分析不足,还需以更多灾害个例验证或用科学的分析方法来确定。

### 2.4 北方果树阴雨灾害指标

果树对阴雨敏感的生育期一般在花期和成熟期。若苹果在开花期遇到低温阴雨天气,一方面容易造成花粉活力下降,授粉不良,导致挂果量减少或者畸形果增多;另一方面,湿度过大引起病菌滋生和蔓延,苹果霉心病发病率显著增加,降低了果实品

表3 陕南猕猴桃、柑橘高温热害指标

Table 3 Indicators of high temperature heat damage of Kiwifruit and Citrus in Southern Shaanxi

灾害名称 Disaster	分析时段 Analysis period	等级 Grade	等级指标 Grade indicator	
			日最高气温(持续时间) Daily maximum temperature (continuous time)	降水距平百分率 Pa/Precipitation anomaly percentage
猕猴桃高温干旱 Kiwifruit high temperature and drought	6—7月 Jun. to Jul.	轻 Light	35 °C ≤ Tg < 38 °C (3~4 d)	-50% < Pa
		中 Moderate	35 °C ≤ Tg < 38 °C (5~8 d)	-70% < Pa ≤ -50%
		重 Severe	35 °C ≤ Tg < 38 °C (≥ 9 d), 38 ≤ Tg °C (≥ 2 d)	Pa ≤ -70%
柑橘高温干旱 Citrus high temperature and drought	6—8月 Jun. to Aug.	轻 Light	37 °C ≤ Tg (3~4 d)	-50% < Pa
		中 Moderate	37 °C ≤ Tg (5~6 d)	-70% < Pa ≤ -50%
		重 Severe	37 °C ≤ Tg (≥ 7 d)	Pa ≤ -70%

质。若苹果在着色-采收期遇到较长时间阴雨天气,光照不足,易造成果实表面返青、着色差,影响外观品质,从而商品率下降,经济效益下降;早熟桃成熟前若遇较长时间低温阴雨灾害,产量和品质显著降低<sup>[46]</sup>。刘璐等<sup>[47]</sup>对陕西省30个苹果基地县,近50年苹果着色-成熟期(9月中旬—10月上旬)连续3 d以上的降水日数和无降水日数进行统计,设计了苹果

着色-成熟期连阴雨指数见公式2;并将该指数分成强、偏强、中等、偏弱、弱5个等级,采用典型K阶自回归AR(K)方法建立预测模型进行预测检验,结果显示预测准确率在83%以上(表4)。该阴雨指标紧密围绕苹果成熟期前关键物候时段致灾要素进行设计,结合科学的预测方法,对当地苹果成熟期连阴雨进行预测,具有较好的应用效果和生产服务效益。

表4 陕西(部分)果业基地县连阴雨指数K阶自回归预测模型(α=0.05)

Table 4 K-order autoregressive forecasting model of continuous rain Indicator in Shaanxi (part) fruit base counties

基地县 Base county	N	K	K阶自回归预测模型 K-order autoregressive prediction model	Rk  <sub>max</sub>	f	Rk  <sub>2a</sub>
白水 Baishui	48	30	y=0.202 1+0.816 6x <sub>30</sub>	0.516	17	0.389
洛川 Luochuan	49	29	y=1.064 9+0.695 0x <sub>29</sub>	0.504	19	0.369
旬邑 Xunyi	49	30	y=0.453 8+0.429 0x <sub>30</sub>	0.389	18	0.378

$$Lu = \geq N_{r \geq 3} / N_{R=0} \quad (2)$$

式中:Lu为连阴雨指数;N<sub>r≥3</sub>为9月中旬-10月上旬降水(R≥0.1 mm)连续3 d及以上的日数;N<sub>R=0</sub>为9月中旬-10月上旬无降水日数。

王景红等<sup>[39]</sup>基于陕西苹果着色-成熟期(9月上旬—10月中旬)连阴雨过程的总降雨量、连阴雨总天数、连阴雨总次数3项要素,对陕西苹果着色-成熟期连阴雨灾害进行了由轻到重的风险分区;基于陕北红枣采摘期(9月上旬—10月中旬)连阴雨过程的总降雨量单要素,对陕北红枣采摘期连阴雨灾害进行了由轻到重的风险分区。上述研究单纯分析了果树关键物候期连阴雨灾害致灾因子的空间分布特征,均未形成相关等级指标,还需要进一步的研究。

### 2.5 北方果树冰雹灾害指标

冰雹灾害也是常见的农业气象灾害之一。冰雹灾害对果树造成的伤害主要是机械性损伤。因为冰

雹灾害形成的特殊原因——是从发展强盛的积雨云中降落到地面的冰球或冰块,具有较强的季节性和局地性,来势猛但一般持续时间短等特点,故民间常有“雹打一条线”的说法。按年冰雹日数多少来评估,冰雹对我国果树危害较大的区域主要分布在云贵高原、华北北部、东北地区及新疆西部,年冰雹日数1~3 d<sup>[38]</sup>;危害的果树树种主要有上述区域的苹果、红枣、葡萄等。李星苇等<sup>[48]</sup>研究了冰雹灾害对阿克苏地区苹果、红枣、葡萄等主要果品的影响;梁轶等<sup>[49]</sup>通过对近50年来陕西苹果产区冰雹日数等气象资料的分析,获得了陕西38个苹果基地县冰雹灾害的时空分布规律:空间上分重度、中度、轻度3个区,年降雹日数分别约2 d、1~2 d、<1 d;时间上雹灾主要发生在每年的夏季,秋季次之;一日内主要发生在14:00-19:00。由于冰雹灾害地域性强的特点,冰雹灾害指标的研究和分析,可为区域内果树布局优化、防灾减灾等提供重要参考依据。



## 2.6 北方果树越冬期冻害指标

北方果树冬季进入休眠期,对低温和干旱的忍耐力显著增强,是一种对低温逆境的适应特征,有利于果树安全度过寒冷缺水的冬季。但是,极端寒冷或干旱的冬季气候条件下,北方果树仍然会发生低温冻害,尤其是幼树和1~2 a生枝梢冻害比较常见<sup>[31]</sup>。

张仕明等<sup>[50]</sup>基于冬季极端最低气温、日平均气温 $\leq -10$  °C负积温、最低气温 $\leq -15$  °C日数3项要素,采用主分量分析方法构建了库尔勒香梨树冬季冻害指数。该指数属于综合冻害指数,包含低温强度、低温持续日数、负积温累积量,采用科学的方法确定各要素之间的权重,并基于多年的典型灾情信息对指数进行了验证,对库尔勒香梨冬季冻害评估具有参考作用,但无法满足灾害监测、预警等需求。

吉春容等<sup>[51]</sup>通过试验确定了新疆巴旦杏3个主栽品种越冬期枝条受冻的半致死温度分别是:‘莎车1号’-24.9 °C、‘英吉沙2号’-29.3 °C、‘莎车18号’-27.7 °C;同时通过试验将巴旦杏冻害形态生理指标分为,未受冻害、轻微冻害、中等冻害、严重冻害、死亡5个级别;通过分析巴旦杏历史灾情信息和气象条件,初步确定了实际生产中巴旦杏轻度、轻度到中度、中度、严重,4种冻害程度时对应的天气气候条件。上述指标研究中,5级形态生理指标划分细致,描述清晰,可用于灾害监测、调查等;但仅为单要素气象指标,应用中需增加经验判断并甄别使用。

黄玖君等<sup>[52-53]</sup>对新疆且末地区红枣越冬期冻害成因进行了分析,基于冬季极端最低气温、日平均气温 $\leq -10$  °C负积温、最低气温 $\leq -18$  °C日数、冬季积雪 $> 1$  cm日数4项要素,采用主分量分析方法构建了且末红枣越冬期冻害指数。该指数属于综合类指数,包含低温强度、低温持续日数、负积温累积量以及对冻害有加强效应的积雪日数,采用科学的方法确定各要素之间的权重而构建,并通过预测检验与实际灾情基本一致,其对当地红枣冬季冻害评估具有参考作用,但在灾害监测、预警等方面适用性差。

## 3 南方果树气象灾害指标研究

### 3.1 南方果树高温灾害指标

我国柑橘主要产区,在柑橘花期-幼果期极易出现高温天气,严重时造成柑橘落花落果,显著减产<sup>[54-57]</sup>。刘云鹏<sup>[57]</sup>根据长江中下游历史时期柑橘花

期高温热害的灾情资料,结合同期气象资料分析总结,以柑橘花期日平均气温( $T_a$ )、日最高气温( $T_g$ )2项因子连续2 d及以上的平均值,将长江中下游柑橘高温热害划分为弱( $T_a \geq 25$  °C、 $T_g \geq 30$  °C)、中( $T_a \geq 26$  °C、 $T_g \geq 32$  °C)、强( $T_a \geq 27$  °C、 $T_g \geq 34$  °C)、极强( $T_a \geq 28$  °C、 $T_g \geq 36$  °C)4个等级。该指标考虑了柑橘花期日平均气温、日最高气温两项气温要素与其持续时间,对柑橘花期高温热害监测、预警具有指导意义;但未考虑空气湿度等的影响,还需要在实际应用中指标进行完善和修订。金志凤等<sup>[21]</sup>通过实测气象资料和果园定点观测,研究了高温干旱对浙江温州蜜桔光合作用、坐果率、果径增长、产量等的影响;陈才发等<sup>[58]</sup>研究发现高温干旱可引发南丰蜜桔缺硼,生长受限。另有研究表明,荔枝、龙眼等主要果树也受高温或干旱的影响<sup>[59,60]</sup>。郑永宁等<sup>[59]</sup>的研究结果显示荔枝在挂果期易遭遇高温热害,严重时造成落叶落果,显著减产;蒋际谋等<sup>[60]</sup>研究了高温干旱对龙眼品质的影响。由此可见,夏季高温干旱对我国南北方果树均有影响,但相关灾害指标研究相对比较薄弱。

### 3.2 南方果树越冬期冻(寒)害指标

相比较在冬季即进入休眠期的北方果树,南方果树在冬季更容易发生低温灾害,且受灾损失更为显著,大灾年份甚至造成整株冻死的毁灭性灾害<sup>[26-27]</sup>。目前,文献可见已有越冬期低温冻(寒)害指标的南方果树有柑橘、荔枝、龙眼、杧果、枇杷等。柑橘属于亚热带多年生喜温常绿果树,主要种植区分布于长江沿线以南和秦岭以南,受分布地域影响越冬冻害时有发生。有关柑橘越冬期冻害的指标,前人的相关研究比较多,陈尚谟等<sup>[8]</sup>在上世纪80年代通过盆栽试验,冻害调查、统计分析等,确定了日最低气温( $T_d$ )为致灾因子的柑橘越冬期低温冻害5级分级标准:0级(没有冻害) $T_d > -5$  °C;1级(轻度) $-7$  °C  $< T_d \leq -5$  °C;2级(中度) $-9$  °C  $< T_d \leq -7$  °C;3级(重度) $-11$  °C  $< T_d \leq -9$  °C;4级(严重) $T_d \leq -11$  °C。之后,随着气候变化、各地柑橘新品种引进等,有学者提出柑橘越冬期冻害不仅与冬季降温强度有关,还与冬季干旱、降温过程伴随雨雪等有关<sup>[26,61]</sup>。基于上述原因,杨爱萍等<sup>[27]</sup>利用气温、降水及其持续时间等,构建了江西省多气象要素的柑橘冻害指标。该多要素柑橘冻害指标分旱冻指标和湿冻指标,指标计算选用因子有极端最低气温、日最低气温低



于-1.5℃的最长持续日数、前一年12月至当年1月降水距平(仅用于旱冻指标计算)、越冬期内最长持续降水日数(仅用于湿冻指标计算)4项。单站冻害指标(F)取干冻指标和湿冻指标之值大者,并采用特尔菲法由轻到重分5个等级;区域冻害指标(F)为单站冻害等级的级数之和的平均值见公式3,对应单站冻害指标同样分5个等级。该多气象要素柑橘冻害指标,通过典型灾害个例对单站冻害指标进行了验证;通过典型重灾年份对区域冻害指标进行了验证,均与实际情况相吻合,说明该指标在进行不同空间尺度柑橘冻害评估方面应用价值较大。但因为指标计算采用因子的限制,不能用来进行柑橘冻害监测、预警等。

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

式中:F为区域冻害指标;n为区域站数; $y_i$ 为第i站柑橘冻害等级的级数

荔枝、龙眼、杧果等一直是我国华南南部的主要名、特、优热带果品,对当地农业经济贡献极大。但随着种植规模扩大和品种更新,冬季寒(冻)害一直是影响荔枝、龙眼、杧果等产量稳定性的最主要气象灾害<sup>[22-23,62-64]</sup>。庞庭颐等<sup>[22]</sup>、匡昭敏等<sup>[23]</sup>通过对广西地区龙眼、荔枝低温冻害的实地调查,历史灾害资料和气象资料的对比分析,建立了以果树植株受冻率(L)和最低气温(Td)对照的华南地区龙眼、荔枝成龄树4级低温冻害指标:1级冻害,L<10%,Td(-0.1~-1.5℃);2级冻害,L(10%~50%),Td(-1.6~-2.0℃);3级冻害,L(50%~80%),Td(-2.1~-3.0℃);4级冻害,L(80%~100%),Td(-3.1~-4.0℃)。同时,通过灾害调查建立了比龙眼、荔枝更不耐寒的杧果成龄树的4级低温冻害指标:1级冻害,L<10%,Td(-0.1~-1.0℃);2级冻害,L(10%~50%),Td(-1.1~-1.5℃);3级冻害,L(50%~80%),Td(-1.6~-2.5℃);4级冻害,L(80%~100%),Td(-2.6~-3.5℃)。上述指标的长处是将果树冻害指标与果树受冻率对应,对灾情快速评估提供依据;也可作为荔枝、龙眼、杧果低温冻害的监测、预警参考指标。缺点是仅包含了低温强度信息,未考虑低温持续时间、空气湿度等对灾害的影响,且作者在文中亦阐述“若低温伴随长期干旱,冻害更甚”,因而指标适用性、精确性仍有待提高。

陈慧等<sup>[30]</sup>基于移植试验、对比验证和统计方法,

分别建立了福建省龙眼、荔枝寒害指标。该指标将龙眼、荔枝的寒害指标区分开来,均分为轻度、中度、重度和严重4级,指标精度有所提高;但同样仅包含了果树在遭遇低温寒害过程中的低温强度信息,忽略了低温持续时间,果园旱涝状况等因素对寒害形成的影响。

杜尧东等<sup>[65]</sup>通过对广东省近50年的寒害灾情资料的分析,确定了荔枝寒害发生的临界温度为5.0℃,并在此基础上计算历年寒害过程的有害积寒,结合极端最低气温、最大降温幅度、低温持续日数3项致灾因子,基于主成分分析方法建立荔枝寒害综合气候指标。该指标为综合指标,致灾因素不仅考虑了极端最低气温、低温持续日数,同时采用了降温幅度和有害积寒两项致灾因子,前者突出了降温前后的温差对作物的致灾效应,后者较以往的负积温更能准确反映植物在一段时间所需忍耐的寒冷总量。作者同时分析了该指标与广东省荔枝气象产量的相关性,结果显示存在明显的负相关关系,证明该综合指标构建精度较好。该综合指标可用来分析评估广东省荔枝寒害情况;但受其所采用致灾因子较多的影响,该综合指标在灾害监测、预警方面适用性差。

李政等<sup>[66]</sup>、陈锦祥等<sup>[67]</sup>基于移植试验、平行观测和历史灾情资料,将杧果低温寒害的形态学指标按照气象灾害5等分级法进行了分级;并采用统计和对比验证的方法建立了对应的杧果寒(冻)害灾害等级指标。李政等<sup>[66]</sup>将杧果寒(冻)害形态学指标与致灾气象因子等级指标对应,有利于灾害等级判断和评估;但气象因子等级指标仅考虑了低温强度,未考虑低温持续时间、果园湿度以及地理地形等的影响,因而该指标在灾害监测、预警等适用性方面需继续完善和修订。

枇杷是福建省主产果品之一,产量占全国枇杷产量1/3,但冬季低温危害比较频繁且严重<sup>[68-69]</sup>。杨凯等<sup>[24]</sup>等通过分析近20年福建省枇杷产区冬季气象资料和枇杷气象产量,并结合灾害调查与观测,确定了枇杷低温受害减产的临界温度为3.0℃。在此基础上,根据枇杷受冻条件分析,确定极端最低气温、≤3℃低温累积值、≤3℃低温日数、≤3℃低温最大持续日数4项因子为枇杷低温害致灾因子,采用主成分分析方法对4项因子进行综合简化,建立福建枇杷低温灾害综合气候指标见公式4,并结合气

象产量进行分级,获得了福建枇杷低温灾害综合气候分级指标(表5)。该指标包含低温致灾临界温度,包含低温强度、持续时间和累积量,并采用科学

的方法形成综合指标,对枇杷低温灾害监测、预警和评估均具有参考和指导意义。

$$HI = -0.50X_1 + 0.487X_2 + 0.506X_3 + 0.505X_4$$

表5 枇杷低温害综合气候指标等级

Table 5 Comprehensive climate indicator grades of Loquat low temperature damage

冻害分级 Grade	轻度 Light	中度 Moderate	重度 Severe	严重 Serious
综合气候指标 HI Comprehensive climate indicator HI	$0.65 \leq HI < 3.37$	$3.37 \leq HI < 6.09$	$6.09 \leq HI < 8.82$	$8.82 \leq HI < 27.88$
减产率 Rate of reduction/%	-10~0	-20~-10	-30~-20	-100~-30

(4)

式中:HI为枇杷冻害综合气候指标; $X_1$ 为极端最低气温; $X_2$ 为 $\leq 3$ ℃低温累积值; $X_3$ 为 $\leq 3$ ℃低温日数; $X_4$ 为 $\leq 3$ ℃低温最大持续日。

#### 4 问题与展望

果树单要素、多要素、综合灾害指标,各有优缺点。总体来说,单要素指标简单、使用方便,常常用在果树气象灾害监测、预警业务服务中。但是存在要素单一,对果树是否成灾预警准确率低的实际情况。多要素指标,考虑致灾因素较多,有时包含持续时间信息,在农业气象业务服务中使用,对天气预报、甚至气候预测的准确率要求比较高,在果树气象灾害监测、预警使用中存在一定的限制条件。综合灾害指标,一般用于灾害评估、灾害风险时空分布特点分析等业务中,不具有提前的灾害监测、预警作用。

果树气象灾害指标研究和构建的技术方法依然比较传统。目前可见的主要是基于经验构建、数学统计方法构建、试验构建3种方法。随着遥感信息技术应用领域的不断扩大,卫星数据反演技术的不断进步,对于果树干旱灾害、低温类灾害等,一旦发生则成灾面积比较广的果树气象灾害,应尝试采用遥感技术,建立不同种类果树气象灾害发生前、发生中、发生后,遥感信息与果园、果树、气象信息的相关关系,采用遥感技术分辨果树气象灾害类型、识别果树气象灾害强度,获取不同种类果树气象灾害的遥感指标,可以大力提高果树气象灾害的监测、预警、评估的时效性<sup>[70-71]</sup>。

果树气象灾害指标的研究成果尚比较薄弱。从指标类型上看,单要素指标居多,多要素、综合指标较少;从涉及的果树种类上看,主要是全国和各省主栽果树的主栽品种,且以时鲜水果果树的灾害指标研究居多,红枣、核桃等杂果果树灾害指标研究较

少;从涉及的灾种看,以低温类灾害为主,研究指标最多,其次有干旱、高温热害、阴雨等的研究指标次多;从目前已有研究成果的分布地区来看,北方果树全生育期可能遭遇的气象灾害种类更多,其中晚霜冻害、高温热害、干旱、冰雹灾害发生频繁,影响较大;南方果树冬季低温冻(寒)害影响最大,且受影响的主要果树种类较多。综合来看,还有许多具有一定产值和规模的果树的气象灾害指标研究仍是空白,如台风、暴雨灾害危害华南地区主要果树的指标研究<sup>[72-73]</sup>;还有一些主要果树的复合气象灾害指标研究较为薄弱或仍是空白,如柑橘、柚树的高温干旱灾害、莲雾的低温阴雨灾害等<sup>[74-77]</sup>。

果树气象灾害指标的研究,在技术方法上比大田农作物要求更高,也更困难。一方面果树均是多年生,不同于一年生农作物,气象灾害对果树的影响机理、致灾机理更加复杂且具有延迟性。如发生在前一年果树花芽分化期的干旱灾害,可影响次年苹果成花率和成花质量。另一方面,栽植果树的地理环境一般较农田作物更为复杂,许多果园分布于山区、梁、峁、沟、坎等不同的地形环境下,这就决定了果树气象灾害的致灾要素中,地形、小气候环境的作用非常明显。目前所看到的果树气象灾害指标,还尚未见到有考虑地形要素的,但在多数有关果树气象灾害风险区划的研究中均有考虑并占取一定的致灾权重<sup>[78-79]</sup>,笔者认为此方面应为以后果树气象灾害指标研究中考虑的致灾要素之一。

我国果树气象灾害指标研究虽然起步于上世纪,但笔者认为,目前相关研究体系尚未真正建立,相关成果也远不能满足果业生产服务的需求。首先,随着我国经济水平的发展,全国各地名、特、优主产果品的现代化管理、规模化生产基地的不断产生,大型果业合作机构不断增加,其需要时间尺度、空间尺度气象灾害监测、预警等气象服务产品更加精细化,尤其是在果树开花期、采收期等关键物候时期。目前,在气象为农服务业务中,尚未见到有成体系的

果树全生育期服务产品;商业化的特色气象服务产品也仅出现在云南、浙江等的茶叶气象服务中;针对果树的气象服务业务也未纳入中国气象局农业气象业务服务考核目标。其次,随着全球气候变化,极端天气事件发生频率增加,强度增大,果树气象灾害种类、不同种类灾害发生的时空规律等均有所变化,如高温与干旱叠加、低温与连阴雨叠加等复合类气象灾害开始频繁发生。因此果树气象灾害指标研究,不仅需要加大对单灾种气象灾害致灾机理、指标的研究,还需研究复杂天气条件下复合灾害对果树的致灾机理和指标。再次,随着生物育种技术的发展以及人们对高品质果品的追求,果树品种换代更新加快,许多非原产地的优良果树不断被引进等,均需要相关农业气象服务技术的及时跟进,果树气象灾害指标研究的及时开展。

#### 参考文献 References:

- [1] 北京智研科信咨询有限公司. 2017-2023年中国水果市场供需态势及投资潜力评估报告[EB/OL]. [2017-07-13]. <http://www.chyxx.com/research/201703/506137.html>.  
Beijing Zhiyan Kexin Consulting Co.. Statistical analysis of fruit planting area and yield in China from 2017 to 2023[EB/OL]. [2017-07-13]. <http://www.chyxx.com/research/201703/506137.html>.
- [2] 北京智研科信咨询有限公司. 2017-2022年中国水果市场供需预测及发展趋势研究报告[EB/OL]. [2017-06-01]. <http://www.chyxx.com/research/201706/537269.html>.  
Beijing Zhiyan Kexin Consulting Co., Ltd.. Research report on supply and demand forecast and development trend of chinese fruit market in 2017-2022[EB/OL]. [2017-06-01]. <http://www.chyxx.com/research/201706/537269.html>.
- [3] 方正中期期货有限公司. 2018年苹果市场回顾与2019年展望[EB/OL]. [2018-12-24]. <http://finance.sina.com.cn/money/future/fmnews/2018-12-24/doc-ihmutuee2026865.shtml>.  
Founder Mid-term Futures Co., Ltd. Review of apple market in 2018 and prospect for 2019[EB/OL]. [2018-12-24]. <http://finance.sina.com.cn/money/future/fmnews/2018-12-24/doc-ihmutuee2026865.shtml>.
- [4] 陈尚谟,黄寿波,温福光. 果树气象学[M]. 北京:气象出版社,1988:3-51.  
CHEN Shangmo, HUANG Shoubo, WEN Fuguang. Meteorology of fruit trees[M]. Beijing: Meteorological Press, 1988:3-51.
- [5] ECCEL E, REA R, CAFFARRA A, CRISCI A. Risk of spring frost to apple production under future climate scenarios: the role of phenological acclimation[J]. International Journal of Biometeorology, 2009, 53(3):273-286.
- [6] RODRIGO J. Spring frosts in deciduous fruit tree: morphological damage and flower hardiness[J]. Scientia Horticulturae, 2000, 85(3):155-173.
- [7] SMAKHTIN V U, HUGHES D A. Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data[J]. Environmental Modelling & Software[J]. 2007, 22(6): 880-890.
- [8] 陈尚谟. 试论我国柑桔的越冬低温指标[J]. 农业气象, 1980, 8(28):86-90.  
CHEN Shangmo. On the index of overwintering low temperature of Citrus in China[J]. Agrometeorology, 1980, 8(28): 86-90.
- [9] 章恢志,陈俊愉,王家恩. 鄂东柑橘冻害调查报告[J]. 华中农学院学报, 1956(1): 71-83.  
ZHANG Huizhi, CHEN Junyu, WANG Jiaen. Investigation report on freezing damage of citrus in eastern hubei[J]. Journal of Central China Agricultural University, 1956(1): 71-83.
- [10] 原芑洲,杜澍,雷少芳. 黄羊河苹果幼树越冬问题调查报告[J]. 西北农业科学, 1957(6): 344-350.  
YUAN Wuzhou, DU Shu, LEI Shaofang. Investigation report on overwintering of young apple trees in Huangyang river[J]. Agricultural Science in Northwest China, 1957(6): 344-350.
- [11] 李娜,霍治国,贺楠,肖晶晶,温泉沛. 华南地区香蕉、荔枝寒害的气候风险区划[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1244-1251.  
LI Na, HUO Zhiguo, HE Nan, XIAO Jingjing, WEN Quanpei. Climatic risk zoning for banana and Litchi's chilling injury in south China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1244-1251.
- [12] 柏秦凤. 华南寒害致灾气候因子及综合指数研究[D]. 北京:中国气象科学研究院, 2008.  
BAI Qinfeng. Research on disaster-caused climatic factors and comprehensive index of cold damage in South China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences. 2008.
- [13] 王景红,柏秦凤,梁轶,刘映宁,张焘,肖晶晶,马小燕. 陕西苹果干旱指数研究及基于县域单元的苹果干旱风险分布[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 516-523.  
WANG Jinghong, BAI Qinfeng, LIANG Yi, LIU Yingning, ZHANG Tao, XIAO Jingjing, MA Xiaoyan. Apple drought index and apple drought risk distribution in Shaanxi at County level[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(3): 516-523.
- [14] 柏秦凤,王景红,郭新,霍治国,梁轶,张勇,杨涛. 基于县域单元的陕西苹果越冬冻害风险分布[J]. 气象, 2013, 39(11): 1507-1513.  
BAI Qinfeng, WANG Jinghong, GUO Xin, HUO Zhiguo, LIANG Yi, ZHANG Yong, YANG Tao. Research on apple wintering frost damage risk distribution based on county level in Shaanxi province[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(11): 1507-1513.
- [15] 柏秦凤,王景红,梁轶,刘璐,霍治国. 基于县域单元的降尺度苹果花期冻害风险区划[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16): 153-158.



- BAI Qinfeng, WANG Jinghong, LIANG Yi, LIU Lu, HUO Zhiguo. The apple flowering frost damage risk zoning down-scaling based on county level[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(16): 153-158.
- [16] 柏秦凤, 王景红, 屈振江, 李美荣, 张维敏. 陕西苹果花期预测模型研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(19): 164-169.
- BAI Qinfeng, WANG Jinghong, QU Zhengjiang, LI Meirong, ZHANG Weimin. The research on Shaanxi apple florescence prediction model[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(19): 164-169.
- [17] 刘璐, 王景红, 张焘. 基于灾情数据的陕西富士系苹果高温热害指标修订研究[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 29-32.
- LIU Lu, WANG Jinghong, ZHANG Tao. Research on the index revision of high heat disaster to Fuji apple in Shaanxi province based on the disaster data[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 29-32.
- [18] 吉春容, 邹陈, 陈丛敏, 刘立宏, 李新建. 低温胁迫下巴旦杏的形态生理变化及抗寒性研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 955-962.
- Ji Chunrong, ZOU Chen, CHEN Congmin, LIU Lihong, LI Xinjian. Morphological and physiological characteristics of Almond under low temperature stress and it's cold resistance[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(4): 955-962.
- [19] 王景红, 刘璐, 高峰, 柏秦凤, 郭梁. 陕西富士系苹果花期霜冻灾害气象指标的修订[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 50-56.
- WANG Jinghong, LIU Lu, GAO Feng, BAI Qinfeng, GUO Liang. Revision on meteorological indices of florescence frost disaster for Fuji apple in Shaanxi Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 50-56.
- [20] 王静, 张晓煜, 杨洋, 张磊, 李红英, 马国飞, 段晓凤. 宁夏梨树霜冻指标试验研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28): 122-127.
- WANG Jing, ZHANG Xiaoyu, YANG Yang, ZHANG Lei, LI Hongying, MA Guofei, DUAN Xiaofeng. Experimental study on frost index of Pear in Ningxia province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(28): 122-127.
- [21] 金志凤, 陈先清, 张昌记. 夏季高温干旱对温州蜜柑果实生长的影响[J]. 中国农业气象, 2005, 26(3): 184-186.
- JIN Zhifeng, CHEN Xianqing, ZHANG Changji. Influence of high temperature and drought in summer on growth of citrus[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2005, 26(3): 184-186.
- [22] 庞庭颐. 荔枝等果树的霜冻低温指标与避寒种植环境的选择[J]. 广西气象, 2000, 21(1): 12-14.
- PANG Tingyi. Frostbite low temperature index and selection of planting environment escaping cold for fruiterers such as Litchi[J]. Journal of Guangxi Meteorology, 2000, 21(1): 12-14.
- [23] 匡昭敏, 李强. 龙眼气象灾害指标及发生规律研究综述[J]. 中国南方果树, 2003, 32(6): 35-38.
- KUANG Zhaomin, LI Qiang. Summary of research on longan meteorological disaster index and occurrence law[J]. Fruit trees in Southern China, 2003, 32(6): 35-38.
- [24] 杨凯, 林晶, 陈慧, 王加义, 陈彬彬, 马治国. 福建枇杷低温寒害临界温度和综合气候指标[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 468-473.
- YANG Kai, LIN Jing, CHEN Hui, WANG Jiayi, CHEN Binbin, MA Zhiguo. Critical temperature and integrated climatic index of low temperature injury for Loquat in Fujian province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2013, 34(3): 468-473.
- [25] 王静, 张晓煜, 杨洋, 张磊, 李红英, 段晓凤, 马国飞, 张学艺. 宁夏杏、李子花期幼果期霜冻指标试验研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(1): 93-98.
- WANG Jing, ZHANG Xiaoyu, YANG Yang, ZHANG Lei, LI Hongying, DUAN Xiaofeng, MA Guofei, ZHANG Xueyi. Experimental study on frost index of Apricot and Plum in Ningxia province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1): 93-98.
- [26] BAI Q F, WANG J H, HUO Z G, LIANG Y, ZHANG W M, GUO M Z. Analysis of meteorological conditions of freeze damage to citrus in Southern Shanxi in the winter of 2010 and defensive counter measures[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(3): 444-449.
- [27] 杨爱萍, 杜筱玲, 王保生, 郭瑞鸽, 刘文英. 江西省多气象要素的柑橘冻害指标[J]. 应用气象学报, 2013, 24(2): 248-256.
- YANG Aiping, DU Youling, WANG Baosheng, GUO Ruige, LIU Wenyong. The Multiple-meteorological-factor indexes for Orange frozen injury in Jiangxi province[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2013, 24(2): 248-256.
- [28] 崔读昌. 关于冻害、寒害、冷害和霜冻[J]. 中国农业气象, 1999, 20(1): 56-57.
- CUI Duchang. On Frost Damage, Cold Damage, Cold Damage and Frost[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1999, 20(1): 56-57.
- [29] 张倩, 赵艳霞, 王春乙. 我国主要农业气象灾害指标研究进展[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(6): 40-54.
- ZHANG Qian, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi. Advances in research on major agro-meteorological disaster index in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(6): 40-54.
- [30] 陈惠, 王加义, 潘卫华, 林晶, 徐宗焕, 杨凯, 李丽纯. 南亚热带主要果树冻(寒)害低温指标的确定[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 148-155.
- CHEN Hui, WANG Jiayi, PAN Weihua, LIN Jing, XU Zonghuan, YANG Kai, LI Lichun. Determination of frozen(cold)injury indicators of main fruit trees in south subtropical area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1): 148-155.
- [31] 马宝焜, 徐继忠. 苹果精细化管理十二个月[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 28.
- MA Baokun, XU Jizhong. Apple fine management 12 months [M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2009: 28.
- [32] 柏秦凤, 李星敏, 朱琳. 近 50 年陕西省无霜期的变化及果区霜冻风险分布[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(8): 65-70.
- BAI Qinfeng, LI Xingmin, ZHU Lin. The changes of the frost-

- tree periods from 1961 to 2010 and its impact on apple industry in Shanxi province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(8): 65-70.
- [33] 柴芊, 栗珂, 刘璐. 陕西果业基地县苹果花期冻害指数及预报方法[J]. *中国农业气象*, 2010, 31(4): 621-626.
- CHAI Qian, LI Ke, LIU Lu. Index of frost damage for apple blossom and its forecast method in Shanxi fruit base[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 621-626.
- [34] 王景红, 柏秦凤, 梁轶, 屈振江, 张焘, 张勇. 2013年陕西苹果花期冻害气象条件分析及受冻指标研究[J]. *果树学报*, 2015, 32(1): 100-107.
- WANG Jinghong, BAI Qinfeng, LIANG Yi, QU Zhenjiang, ZHANG Tao, ZHANG Yong. Study on freezing index and weather conditions causing Shaanxi apple florescence freezing injury in 2013[J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(1): 100-107.
- [35] 中国气象局. 富士系苹果花期冻害等级: QX/T-392-2017 [S]. 北京: 气象出版社, 2018.
- China Meteorological Administration. Grade of florescence freezing injury to Fuji apple: QX/T-392-2017 [S]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2018.
- [36] 陈丛敏, 刘立宏, 王东, 吉春容, 邹陈. 巴旦杏春季低温霜冻灾害气象指标分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2014, 8(1): 57-60.
- CHEN Congmin, LIU Lihong, WANG Dong, JI Chunrong, ZOU Chen. Analysis of meteorological indexes of freeze injury on *Amygdalus Communis L.* in Spring[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2014, 8(1): 57-60.
- [37] 刘伟, 刘艳丽, 焦慧亮, 陶娜. 乌兰布和沙区酿酒葡萄赤霞珠春霜冻指标试验研究[J]. *农技服务*, 2017, 14(34): 12-13.
- LIU Wei, LIU Yanli, JIAO Huiliang, TAO Na. Experimental study on spring frost index of Cabernet Sauvignon of wine grape in Ulanbu and sandy area[J]. *Agricultural Technology Services*, 2017, 14(34): 12-13.
- [38] 中国气象局. 中国灾害性天气气候图集[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- China Meteorological Administration. Atlas of China disastrous weather and climate[M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2007.
- [39] 王景红, 梁轶, 柏秦凤. 陕西主要果树气候适宜性与气象灾害风险区划图集[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 2012: 177-181.
- WANG Jinghong, LIANG Yi, BAI Qinfeng. Atlas of climate suitability and meteorological disaster risk zoning of major fruit trees in Shaanxi[M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 2012: 177-181.
- [40] 吕岩. 猕猴桃园热害防控[J]. *西北园艺*, 2018(8): 8-9.
- LÜ Yan. How to prevent and control the heat damage in kiwifruit orchards[J]. *Northwest Horticulture*, 2018(8): 8-9.
- [41] 张强. ‘富士’苹果果实品质与土壤养分和气象因子关系的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- ZHANG Qiang. Study on relationship between fruit quality of “Fuji” apple and soil nutrition, meteorological factors[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.
- [42] 刘璐, 屈振江, 张勇, 李艳莉. 陕西猕猴桃果品气候品质认证模型构建[J]. *陕西气象*, 2017(4): 21-25.
- LIU Lu, QU Zhenjiang, ZHANG Yong, LI Yanli. Construction of climate quality certification model for Kiwifruit fruits in Shaanxi[J]. *Shaanxi Meteorology*, 2017(4): 21-25.
- [43] 李艳莉, 刘应宁, 李美荣, 李键. 陕西果树高温热害气象特征分析[J]. *陕西农业科学*, 2007(3): 65-70.
- LI Yanli, LIU Yingning, LI Meirong, LI Jian. Analysis of meteorological characteristics of high temperature heat damage of fruit trees in Shaanxi Province[J]. *Shaanxi Agricultural Science*, 2007(3): 65-70.
- [44] 王景红, 梁轶, 李艳莉. 陕西气候资源开发与优质苹果生产[M]. 北京: 气象出版社, 2014: 69-72.
- WANG Jinghong, LIANG Yi, LI Yanli. Development of climate resources and production of high quality apple in Shaanxi [M]. Beijing: Meteorological Publishing House, 2014: 69-72.
- [45] 罗青, 张波, 曹有龙. 枸杞落花落果的原因探讨及对策[J]. *宁夏农林科技*, 2011, 52(7): 69-70.
- LUO Qing, ZHANG Bo, CAO Youlong. Reasons and countermeasures for falling flowers and fruits of Chinese wolfberry[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2011, 52(7): 69-70.
- [46] 涂美艳, 陈栋, 谢红江, 孙淑霞, 李靖, 杜晋城, 江国良. 持续低温阴雨天气对四川盆地早熟桃生产的影响[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(36): 22280-22282.
- TU Meiyang, CHEN Dong, XIE Hongjiang, SUN Shuxia, LI Jing, DU Jincheng, JIANG Guoliang. Effects of sustainable low temperature and over rain weather on early Peach production in Sichuan Basin[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2011, 39(36): 22280-22282.
- [47] 刘璐, 马杰. 陕西苹果成熟期连阴雨指数及预报方法研究[J]. *气象*, 2012, 38(8): 1012-1016.
- LIU Lu, MA Jie. Research on index of continuous rainfall days and forecasting method in Shaanxi apple maturity period[J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(8): 1012-1016.
- [48] 李星苇, 孙震, 孙桂丽, 赵伟, 汪涛. 冰雹灾害对阿克苏地区果树的影响分析[J]. *农业灾害研究*, 2016, 6(8): 32-35.
- LI Xingwei, SUN Zhen, SUN Guili, ZHAO Wei, WANG Tao. Influence of Hail disaster on fruit trees in Aksu Prefecture[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2016, 6(8): 32-35.
- [49] 梁轶, 王景红, 邸永强, 柏秦凤, 刘耀武. 陕西苹果果区冰雹灾害分布特征及风险区划[J]. *灾害学*, 2015, 30(1): 135-140.
- LIANG Yi, WANG Jinghong, DI Yongqiang, BAI Qinfeng, LIU Yaowu. Study on the distribution and risk zoning of Hail disaster of apple in Shaanxi province[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1): 135-140.
- [50] 张仕明, 吴钧, 史玉辉, 张克云. 库尔勒香梨树冬季冻害指数及其变化特征分析[J]. *中国农业气象*, 2012, 33(3): 462-467.

- ZHANG Shiming, WU Jun, SHI Yuhui, ZHANG Keyun. Winter freezing damage index and it's effect to Fragrant Pear trees in Korla Area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(3): 462-467.
- [51] 吉春容, 邹陈, 陈丛敏, 马鸿儒, 李新建. 巴旦杏越冬冻害气象指标[J]. 气象科技, 2013, 41(1): 202-206.
- JI Chunrong, ZOU Chen, CHEN Congmin, MA Hongru, LI Xinjian. Meteorological index of freeze injury on Amygdalus Communis Lin winter[J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(1): 202-206.
- [52] 黄玖君, 吉春容, 李大武, 冯浩, 邓新. 且末红枣冬季冻害成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(1): 63-68.
- HUANG Jiuju, JI Chunrong, LI Dawu, FENG Hao, DENG Xinjian. Analysis of freezing injury on Jujube in Qiemo in winter[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(1): 63-68.
- [53] 黄玖君, 李大武, 张慧琴, 邓新建, 冯浩. 且末地区红枣越冬综合冻害指数研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014, 8(6): 56-59.
- HUANG Jiuju, LI Dawu, ZHANG Huiqin, DENG Xinjian, FENG Hao. Index of freezing injury on Jujube in Qiemo Area in winter[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(6): 56-59.
- [54] 吴韶辉, 朱美红. 柑橘高温热害生理作用机理研究进展(综述)[J]. 浙江柑橘, 2013, 30(2): 7-11.
- WU Shaohui, ZHU Meihong. Advances in physiological mechanism of Citrus heat injury at high temperature(review)[J]. Citrus in Zhejiang Province, 2013, 30(2): 7-11.
- [55] 胡安生, 管彦良, 蒋斌芳, 郑重禄, 刘祖祺. 柑桔高温热害及防护技术[J]. 农业环境保护, 1997, 16(3): 102-107.
- HU Ansheng, GUAN Yanliang, JIANG Binfang, ZHENG Zhonglu, LIU Zuqi. Heat injury on Citrus and it's prevention[J]. Agro-environmental Protection, 1997, 16(3): 102-107.
- [56] 何寿仁. 江西南丰县南丰蜜桔主要气象灾害变化趋势[J]. 中国南方果树, 2013, 42(6): 42-45.
- HE Shouren. The trend of main meteorological disasters of Nanfeng orange in Nanfeng County Jiangxi Province [J]. Fruit Trees in Southern China, 2013, 42(6):42-45.
- [57] 刘云鹏. 长江中下游气候变化与柑橘花期高温热害[J]. 中国南方果树, 1997, 26(1): 25.
- LIU Yunpeng. Climate change in the middle and lower reaches of the Yangtze River and high temperature and heat damage during Citrus flowering[J]. Fruit Trees in Southern China, 1997, 26(1): 25.
- [58] 陈发才, 刘智强. 高温干旱引发南丰蜜桔缺硼及其矫治方法[J]. 中国南方果树, 2004, 33(4):7.
- CHEN Facai, LIU Zhiqiang. Boron deficiency of Nanfeng orange caused by high temperature and drought and its remedial methods[J]. Fruit Trees in Southern China, 2004, 33(4):7.
- [59] 郑永宁. 东刘一号荔枝挂果期高温热害防护[J]. 福建果树, 2013(3):47.
- ZHENG Yongning. Protection against high temperature heat damage of Dongliu No. 1 Litchi during fruit-hanging period[J]. Fujian Fruit Trees, 2013(3): 47.
- [60] 蒋际谋, 陈秀萍, 李韬, 许秀淡. 高温干旱对龙眼种质群体果实性状的影响[J]. 福建农业学报, 2005, 20(3): 154-157.
- JIANG Jimou, CHEN Xiuping, LI Tao, XU Xiudan. Effect of high temperature and drought condition on the colony fruit character of longan[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2005, 20(3): 154-157.
- [61] 周建龙. 柑桔冻害的天气气候分析及生产建议[J]. 气象, 1992, 18(6): 56-61.
- ZHOU Jianlong. Climate and weather analysis of Citrus frozen injury and production suggestions [J]. Meteorologica, 1992, 18(6): 56-61.
- [62] 植石群, 周世怀, 张羽. 广东省荔枝生产的气象条件分析和区划[J]. 中国农业气象, 2002, 23(1): 20-25.
- ZHI Shiqun, ZHOU Shihuai, ZHANG Yu. Analysis and divisions of meteorological conditions in Litchi production in Guangdong[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, 23(1): 20-25.
- [63] 植石群, 刘锦奎, 杜尧东, 刘爱君. 广东省香蕉寒害风险分析[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 113-116.
- ZHI Shiqun, LIU Jinluan, DU Yaodong, LIU Aijun. Risk analysis of cold damage to banana in Guangdong province[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(2): 113-116.
- [64] 杜鹏, 李世奎, 温福光, 周世怀. 珠江三角洲主要热带果树农业气象灾害风险分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(增刊): 26-32.
- DU Peng, LI Shikui, WEN Fuguang, ZHOU Shihuai. Agrometeorological hazard risk analysis of four main fruit trees in Zhujing delta of South China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1995, 6(Suppl.): 26-32.
- [65] 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[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2): 225-230.
- DU Yaodong, LI Chunmei, MAO Huiqin. Disaster-inducing factors and integrated climatic index for banana and Litchi chilling injuries in Guangdong province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(2): 225-230.
- [66] 李政, 苏永秀, 王莹, 陈慧, 陆虹. 芒果寒(冻)害等级划分及低温指标确定[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 18-22.
- LI Zheng, SU Yongxiu, WANG Ying, CHEN Hui, LU Hong. Determination of cold(freezing)injury classification and indicator of low temperature on Man-go[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 18-22.
- [67] 陈锦祥. 龙眼、荔枝和芒果树寒害分级标准划分和寒害树处理[J]. 广西热作科技, 1996, 60(3): 17-19.
- CHEN Jinxiang. Classification criteria for chilling injury of longan, litchi and mango trees and treatment of chilling injury trees [J]. Guangxi Hot Work Science and Technology, 1996, 60(3): 17-19.
- [68] 王加义, 陈家金, 李丽纯, 徐宗焕. GIS 在福建枇杷低温冻害分析中的应用[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增 1):153-156.
- WANG Jiayi, CHEN Jiajin, LI Lichun, XU Zonghuan. GIS Ap-



- plication to the analysis of low-temperature damage of loquat in Fujian[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(Suppl.1): 153-156.
- [69] 翁志辉. 浅析福建省枇杷幼果的冻害情况及预防与补救措施[J]. 福建农业科技, 2005(1): 16-18.
- WENG Zhihui. The freezing damage of loquat young fruit in Fujian Province and the preventive and remedial measures[J]. Fujian Agricultural Science and Technology, 2005(1): 16-18.
- [70] SHE B, HUANG J F, GUO R F, WANG H B, WANG J. Assessing winter oilseed rape freeze injury based on Chinese HJ remote sensing data[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B(Biomedicine & Biotechnology), 2015, 16(2): 131-144.
- [71] 董婷, 任东, 孟令奎, 张文, 邵攀. 基于阈值优化模糊投票法的农业旱情等级遥感评估[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 137-145.
- DONG Ting, REN Dong, MENG Lingkui, ZHANG Wen, SHAO Pan. Remote sensing evaluation of drought degree based on threshold-optimized fuzzy majority voting model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 137-145.
- [72] 梁李宏, 梁林州, 梅新, 黄伟坚, 张中润. 台风“达维”为害海南腰果生产情况调查[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1): 1-6.
- LIANG Lihong, LIANG Linzhou, MEI Xin, HUANG Weijian, ZHANG Zhongrun. A survey of typhoon Dawei's damage to cashew production in Hainan[J]. Journal of South China University of Tropical Agriculture, 2006, 12(1): 1-6.
- [73] 戴文远, 林金和, 林伟龙. 福建沿海坡地果园热带气旋成灾分析及减灾对策: 以漳浦县为例[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2001, 17(3): 108-112.
- DAI Wenyuan, LIN Jinhe, LIN Weilong. The analysis of causes and countermeasures of lessening disaster to the tropical cyclone in hillside orchard of Fujian coastal areas: take Zhangpu County for example[J]. Journal of Fujian Teachers University(Natural Science), 2001, 17(3): 108-112.
- [74] 范方福. 恭城县月柿生长气象条件分析及气象灾害防御[J]. 农业灾害研究, 2019, 9(1): 27-29.
- FAN Fangfu. Analysis of meteorological conditions for the growth of Gongcheng persimmon and prevention of meteorological disasters[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2019, 9(1): 27-29.
- [75] 曹炎成, 吴海镇, 毛智军, 李建业, 周志成. 异常高温干旱天气对胡柚产量与品质的影响[J]. 中国园艺文摘, 2015(6): 8-10.
- CAO Yancheng, WU Haizhen, MAO Zhijun, LI Jianye, ZHONG Zhicheng. Effects of exceptional high temperature and drought on yield and quality of Citrus grandis[J]. Chinese Horticultural Abstracts, 2015 (6): 8-10.
- [76] 李娅娜, 邓鹏飞. 高温干旱对南丰蜜桔的危害与预防[J]. 农业与技术, 2014, 34(11): 126-127.
- LI Yana, DENG Pengfei. Harm and prevention of high temperature and drought on Nanfeng Orange[J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(11): 126-127.
- [77] 侯伟, 李伟光, 陈小敏, 官满元, 潘家利, 杨昌贤. 海南岛莲雾低温阴雨灾害风险区划研究[J]. 广东农业科学, 2016, 43(12): 70-75.
- HOU Wei, LI Weiguang, CHEN Xiaomin, GUAN Manyuan, PAN Jiali, YANG Changxian. Study on risk zoning of lotus fog low temperature rain disaster in Hainan Island[J]. Agricultural Science in Guangdong Province, 2016, 43(12): 70-75.
- [78] 刘璐, 柏秦凤, 梁轶. 陕西省苹果膨大期高温热害精细化风险区划及评估研究: 以白水为例[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(3): 215-219.
- LIU Lu, BAI Qinfeng, LIANG Yi. Refined risk assessment and regionalization of heat injury in enlargement period of apple in Shaanxi province: A case study in Baishui county[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2014, 42(3): 215-219.
- [79] 谢远玉, 张智勇, 黄雪松, 王丽平. 赣南脐橙冻害风险评估和区划[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(6): 217-222.
- XIE Yuanyu, ZHANG Zhiyong, HUANG Xuesong, WANG Liping. Risk assessment and zoning of freeze injury to navel orange in south Jiangxi[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(6): 217-222.