

柏秦凤,王景红,李化龙,等. 美味系猕猴桃越冬冻害指标. 应用气象学报, 2021, 32(4): 504-512.
DOI: 10. 11898/1001-7313. 20210411

美味系猕猴桃越冬冻害指标

柏秦凤^{1)*} 王景红¹⁾ 李化龙¹⁾ 张维敏¹⁾ 郭建平²⁾ 张 焘¹⁾ 贺晨昕³⁾

¹⁾(陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心, 西安 710016)

²⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

³⁾(陕西省渭南市气象局, 渭南 714000)

摘 要

通过对 1991—2020 年越冬期灾害调查、历史灾情查阅和专家评估,初步建立美味系猕猴桃越冬冻害症状及对应指标的 3 级评价标准。基于对美味系猕猴桃陕西及河南 4 个主栽县 28 例灾害个例致灾因子的主成分分析和 K-means 聚类分析,构建了美味系猕猴桃越冬冻害的综合指标及分级标准,并用 3 个主栽县资料进行验证。结果表明:美味系猕猴桃越冬冻害轻度、中度、重度发生的低温指标(T_D)分别为 $-12.0^\circ\text{C} < T_D \leq -8.0^\circ\text{C}$, $-15.0^\circ\text{C} < T_D \leq -12.0^\circ\text{C}$, $T_D \leq -15.0^\circ\text{C}$;综合气候致灾因子包括过程极端最低气温(X_1)、 -8.0°C 以下低温持续日数(X_2)、 -8.0°C 以下负积温的绝对值(X_3)、 -8.0°C 以下过程有害积寒(X_4);美味系猕猴桃越冬冻害轻度、中度、重度发生的综合指标(I_h)分别为 $-2.08 < I_h \leq 0.82$, $0.82 < I_h \leq 2.15$, $I_h > 2.15$;美味系猕猴桃越冬冻害低温指标及综合指标等级划分在 3 个县验证应用结果均与实际情况基本相符。研究成果可为我国美味系猕猴桃越冬期冻害的防御和评价、产业布局优化、引种等提供参考依据。

关键词: 美味系猕猴桃; 越冬冻害; 指标; 主成分分析; K-means 聚类分析

引 言

猕猴桃原产于中国,营养价值极高,含有钙、钾、硒等多种微量元素和 17 种人体需要的氨基酸以及丰富的维生素 C、葡萄糖、果糖、柠檬酸等,又兼具药用价值,因而号称水果之王^[1]。中国是猕猴桃人工栽培面积最大的国家^[2-3],且美味系猕猴桃占 67%^[4]。猕猴桃产业已经成为其栽培区支柱型农业产业和农民主要收入来源。中国猕猴桃第一、第二大产区分别位于陕西省秦岭北麓和河南省伏牛山、桐柏山等地,产业规模分别占到全国的 40% 和 20% 左右^[5]。上述产区位于我国猕猴桃种植北缘,栽培品种以抗冻性较好的美味系为主;但是猕猴桃越冬冻害时有发生,常给果农造成极大的经济损失^[6-9]。随着猕猴桃产业规模的继续扩张和气候变化背景下北半球区

域极端低温事件的多发趋势,猕猴桃北缘产区越冬期冻害将可能更频发^[4,10-11]。

目前,有关猕猴桃越冬冻害指标的研究尚较薄弱。赵英杰等^[12]对 20 世纪 80 年代中期秦岭北麓猕猴桃商业化种植以来的 5 次较大猕猴桃越冬冻害进行对比分析,认为造成猕猴桃越冬冻害的气候原因是空气湿度高,低温持续时间长。黄长社等^[13]依据 2002—2015 年陕西周至猕猴桃物候观测资料,结合越冬期最低气温(T_D)分析认为猕猴桃幼树和成龄树越冬期受冻临界指标分别如下:轻度冻害, $-10.0^\circ\text{C} < T_D \leq -8.0^\circ\text{C}$, $-12.0^\circ\text{C} < T_D \leq -10.0^\circ\text{C}$;中度冻害, $-12.0^\circ\text{C} < T_D \leq -10.0^\circ\text{C}$, $-15.0^\circ\text{C} < T_D \leq -12.0^\circ\text{C}$;重度冻害, $T_D \leq -12.0^\circ\text{C}$, $T_D \leq -15.0^\circ\text{C}$ 。闵艳娥等^[9]认为 -9.0°C 是陕西渭南地区猕猴桃越冬冻害发生的临界低温。张清明^[1]、齐秀娟等^[14]、张芒果等^[15]认为猕猴桃越冬期冻害发生

2021-04-02 收到, 2021-05-25 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2019YFD1002202)

* 邮箱: qinfeng333@163.com

的主要原因是低温过程早、极端最低气温低、低温持续时间长(以日最低气温低于 -8.0°C 统计)。上述研究成果,或要素单一,或仅提出可能致使美味系猕猴桃受冻气候条件,或仅有指标而缺乏与之对应的生理生态指标,且冻害临界指标使用不统一,对产业服务指导性不强。为此本文对陕西、河南两地美味系猕猴桃产区7个主要猕猴桃栽培县,历史上7次影响范围较大的越冬期冻害案例进行详细调查、分析和研究,确定美味系猕猴桃越冬期冻害发生的临界低温指标,并在此基础上采用主成分分析方法探讨猕猴桃越冬冻害与低温持续时间、最低气温、低于受冻临界温度的负积温、冻害过程积寒等相关致灾要素的关系,构建美味系猕猴桃越冬冻害综合指标,并采用聚类分析方法对其进行分级,以期为中国美味系猕猴桃两大主产区产业防灾减灾、灾情评估以及进行合理的引种、优化布局等提供决策参考。

1 资料与方法

1.1 资料

美味系猕猴桃秦岭北麓和伏牛山、桐柏山种植区1991—2020年越冬冻害灾情资料主要来源于实地调查、专家访谈和文献查阅等。

气象资料包括陕西鄂邑、周至、眉县、长安、武功以及河南桐柏、西峡7个县1991—2020年越冬期

(越冬期指当年11月—次年2月,因此气象资料实际采用至2021年2月)日最低气温、日照时数、相对湿度。

1.2 方法

1.2.1 美味系猕猴桃越冬冻害灾情样本序列构建

通过多种方法收集陕西秦岭以北和河南桐柏、西峡两大美味系猕猴桃产区的历史越冬冻害灾情资料,主要发生年份在1991年、2002年、2007年、2009年、2011年、2015年和2020年共7个冬季^[1,12-17]。通过实地调查和专家访谈对陕西周至、鄂邑、眉县、长安、武功以及河南桐柏、西峡共7个美味系猕猴桃规模化栽培县,在上述年份猕猴桃越冬冻害的具体受灾程度和损失进行调查和评估,获取初步的美味系猕猴桃越冬冻害灾情等级、对应受灾症状和灾损信息等。

将周至、眉县、鄂邑、桐柏4县所获灾情资料作为分析样本。首先,结合文献和调查信息确定美味系猕猴桃越冬冻害的受害临界温度,以及轻度、中度、重度发生的临界指标;其次,采用主成分分析方法构建美味系猕猴桃越冬冻害综合指标,并采用K-means聚类分析方法对综合指标进行分级^[18-19];最后,采用长安、武功、西峡3个县的灾情样本序列对所构建的美味系猕猴桃越冬冻害指标进行检验。秦岭北麓和伏牛山、桐柏山地区7个美味系猕猴桃为主的栽培县地理信息及越冬期最低气温见表1。

表1 美味系猕猴桃主要栽培县地理气候概况
Table 1 Geography and climate in main cultivation counties of tasty kiwifruit

栽培县	地理位置	海拔/m	11月—次年2月最低气温/ $^{\circ}\text{C}$
鄂邑	34.1°N,108.6°E	411.0	-14.5
周至	34.1°N,108.2°E	436.0	-14.3
眉县	34.3°N,107.7°E	517.6	-16.1
长安	34.1°N,108.9°E	445.0	-17.4
武功	34.3°N,108.2°E	471.0	-17.7
桐柏	32.4°N,113.4°E	153.0	-16.8
西峡	33.3°N,111.5°E	250.3	-11.5

1.2.2 美味系猕猴桃越冬冻害致灾因子选取

经济作物遭受冻(寒)害的程度,与低温持续时间、低温强度均有关^[20-22],积寒是考虑低温持续时间和强度对经济作物受冻(寒)害的综合性因子。本文结合前人对美味系猕猴桃越冬冻害致灾气候条件的总结和分析,选择日最低气温(指示降温强度)、低于

美味系猕猴桃越冬冻害临界温度的日数(指示低温持续时间)、负积温(指示降温剧烈性)、积寒(指示植物总体所遭受的危害量)、日照、平均相对湿度共6项要素,分析其对美味系猕猴桃越冬期冻害的致灾作用。

1.2.3 积寒计算方法

积寒指降温天气过程中,逐时低于果树临界受冻温度的寒冷量的累积。基于气温昼夜变化具有周期性的特点,将单日积寒计算公式离散化,并经过积分变量转换,则可得到冻害发生过程中多日内果树受到积寒总量(X)的近似计算公式^[20-21]:

$$X = 1/4 \sum_{i=1}^n [(T_c - T_D)^2 / (T_m - T_D)]。 (1)$$

式(1)中, X 为过程有害积寒(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$), n 为过程持续日数(单位: d), T_c 为作物受害临界温度(单位: $^{\circ}\text{C}$), T_D 为日最低气温(单位: $^{\circ}\text{C}$), T_m 为日平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$)。

1.2.4 致灾因子标准化

美味系猕猴桃越冬冻害各项致灾因子量纲不同,因此在比较其致灾作用时需要对其进行标准化,采用 SPSS 统计软件中的 Z-score 标准化方法对各项因子进行标准化处理。

2 结果分析

2.1 美味系猕猴桃越冬冻害临界温度

张清明^[1]对统计至今秦岭北麓最严重的一次猕猴桃越冬冻害(1991年冬季)的分析认为, -8.0°C 以下低温持续时间长是导致猕猴桃严重冻害原因之一;黄长社等^[13]认为 -8.0°C 是猕猴桃幼树或幼枝受冻的临界温度。陕西省农业遥感与经济作物气象服务中心基于历史上7次范围较大的猕猴桃越冬冻害过程,对美味系猕猴桃产区进行实地调查和访问,构建美味系猕猴桃越冬冻害灾情样本序列(表2)。实地调查中,因主要针对猕猴桃历史灾情进行调查,绝大多数灾情个例无法获取详细的果树或枝条受冻率,因而仅以较为敏感的经济损失信息为依据,明确轻度灾害灾损率不高于30%、中度灾害灾损率高于30%且不高高于50%、重度灾害灾损率高于50%(本

表 2 美味系猕猴桃 7 次越冬冻害最低气温与灾损率调查表

Table 2 Minimum temperatures and damage rates of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit

越冬期	鄂邑		眉县		周至		桐柏	
	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	灾损率/%	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	灾损率/%	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	灾损率/%	最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	灾损率/%
1991 年	-13.5	70	-15.6	70	-14.3	70	-16.8	70
2002 年	-11	50	-16.1	70	-11.7	30	-8.2	30
2007 年	-9.5	30	-12.1	30	-10.4	30	-11.3	50
2009 年	-6.3	0	-9.7	30	-8.5	30	-6.6	0
2011 年	-8.7	30	-14.1	30	-13.7	50	-7.4	30
2015 年	-14.0	50	-12.3	30	-12.4	30	-10.2	30
2020 年	-11.2	30	-11.2	30	-11.5	30	-8.8	30

文重度灾害以平均灾损约 70%计)统计受灾后的损失^[23]。

由表 2 可见,4 个美味系猕猴桃主要栽培县在 7 次较大范围的越冬冻害期间,美味系猕猴桃受冻致灾的临界温度仅有 1 例在 -8.0°C 以上,为桐柏县 2011 年冬季猕猴桃越冬冻害,其余均在 -8.0°C 以下,据此,初步判定 -8.0°C 是美味系猕猴桃越冬冻害发生的临界温度。

2.2 美味系猕猴桃越冬冻害等级及指标

依据文献资料、实地调查和专家咨询,对美味系猕猴桃越冬冻害进行分级,以日最低气温(T_D)单要素指标,初步将美味系猕猴桃越冬冻害划分为轻度、中度、重度 3 级,并归纳总结各级冻害成灾后美味系

猕猴桃表现的受冻症状。如 1991 年冬季的冻害,大部分栽培县极端最低气温达到或接近 -15.0°C ,是至今对美味系猕猴桃影响范围最广、致灾程度最重的一次越冬冻害,此次冻害导致秦岭北麓各栽培县猕猴桃减产 50%~92%,部分果园全园果树冻死^[1];另据调查,1991 年冬季河南桐柏等地美味系猕猴桃大面积冻死,损失同样极为惨重。安成立等^[16]对 2009 年冬季陕西省 4 个猕猴桃主产地越冬期冻害的调查显示:陕西猕猴桃树平均受冻率为 31.3%,随着树龄增大受冻率降低,4 年成龄树受冻率约 11%。综合调查咨询与文献信息,获得美味系猕猴桃越冬冻害等级低温指标及各级对应冻害症状表现如表 3。

表 3 美味系猕猴桃越冬冻害低温指标和症状表现

Table 3 Low temperature indicators and symptoms of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit

级别	低温指标	主要冻害症状表现
轻度	$-12.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -8.0^{\circ}\text{C}$	树体有部分一年生枝条脱水皱缩,或虽没有表现皱缩,但切断枝条髓部表现褐色,其他部位基本不受影响;整个树体春季大部分枝条能正常萌芽;对当年减产影响小于 30%
中度	$-15.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -12.0^{\circ}\text{C}$	树体上部大部分枝条脱水皱缩,或虽没有表现皱缩,但切断枝条髓部表现褐色;部分主杆受冻,树皮开裂;春季部分枝条不能正常萌芽,个别主杆受冻严重的树死亡;对当年减产影响小于 50%
重度	$T_D \leq -15.0^{\circ}\text{C}$	树体上部几乎所有枝条脱水皱缩,切断枝条髓部表现深褐色;多数主杆受冻开裂;春季地上部几乎所有枝蔓死亡,春季不能萌发新叶,部分枝蔓基部可发出萌蘖,部分植株整株死亡;对当年减产影响 50% 以上

2.3 美味系猕猴桃越冬冻害综合指标

猕猴桃越冬冻害的致灾气候要素不仅是极端最低气温,还包括低温持续时间、湿度、日照等条件^[1,12,14-15]。鉴于此,本文对所收集的历史时期美味系猕猴桃越冬冻害案例的致灾因子进行逐一统计和分析,筛选出与美味系猕猴桃越冬冻害灾损率相关的因子,构建综合指标并分级。

以周至、眉县、鄂邑、桐柏 4 县所获灾情资料为

分析样本,选择日最低气温(X_1)、 -8.0°C 以下低温日数(X_2)、 -8.0°C 以下负积温的绝对值(X_3)、 -8.0°C 以下有害积寒(X_4)、平均日照(X_5)、平均相对湿度(X_6)共 6 项要素分析其与美味系猕猴桃越冬冻害灾损率(L)的相关关系。分析发现, X_5 和 X_6 2 项因子与 L 未达到 0.01 显著性水平,而 $X_1 \sim X_4$ 4 项因子与 L 达到 0.01 显著性水平(表 4、表 5)。

由表 5 可见,美味系猕猴桃越冬冻害的 4 项致

表 4 周至、眉县、鄂邑、桐柏美味系猕猴桃越冬冻害致灾因子及灾损率
Table 4 Disaster factors and damage rates of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit at Zhouzhi, Meixian, Huyi and Tongbai

受灾县(区)	越冬期	$X_1/^{\circ}\text{C}$	X_2/d	$X_3/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$	$X_4/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{d})$	$L/\%$
周至	1991 年	-14.3	8	17.5	1.06	70
	2002 年	-11.7	5	4.8	0.34	30
	2007 年	-10.4	4	3.5	0.21	30
	2009 年	-8.5	2	0.5	0.02	30
	2011 年	-13.7	6	12.3	0.60	50
	2015 年	-12.4	6	15.3	0.74	30
	2020 年	-11.5	6	10.1	1.09	30
眉县	1991 年	-15.6	8	23.3	1.47	70
	2002 年	-16.1	12	36.4	1.90	70
	2007 年	-12.1	11	14.8	0.86	30
	2009 年	-9.7	9	6.3	0.30	30
	2011 年	-14.1	8	21.0	0.93	30
	2015 年	-12.3	5	10.8	0.56	30
	2020 年	-11.2	5	6.4	0.70	30
鄂邑	1991 年	-13.5	6	12.7	0.82	70
	2002 年	-11.0	5	4.7	0.35	50
	2007 年	-9.5	2	2.3	0.15	30
	2009 年	-6.3	0	0.0	0.00	0
	2011 年	-8.7	1	0.7	0.05	30
	2015 年	-14.0	5	17.1	0.80	50
	2020 年	-11.2	6	11.5	0.83	30
桐柏	1991 年	-16.8	6	19.1	0.81	70
	2002 年	-8.2	2	0.3	0.01	30
	2007 年	-11.3	4	5.0	0.21	50
	2009 年	-6.6	0	0.0	0.00	0
	2011 年	-7.4	0	0.0	0.00	30
	2015 年	-10.2	2	3.3	0.13	30
	2020 年	-8.8	2	1.1	0.04	30

表 5 各致灾因子及美味系猕猴桃越冬冻害灾损率的相关性
Table 5 The correlations between the disaster factors and the damage rates of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit

要素	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/d	$X_3/(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$	$X_4/(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$	$L/\%$
$X_1/^\circ\text{C}$	1	-0.782	-0.895	-0.851	-0.823
X_2/d		1	0.838	0.843	0.575
$X_3/(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$			1	0.948	0.680
$X_4/(^\circ\text{C}\cdot\text{d})$				1	0.654

灾因子完全不独立,两两之间均呈显著相关关系,可见 4 项致灾因子的关系符合主成分分析条件,可采取主成分分析方法对其进行主要信息提取和综合简化。

基于 SPSS 统计软件中的 Z-score 标准化功能对美味系猕猴桃越冬冻害 4 项致灾因子 X_1, X_2, X_3, X_4 进行标准化得到标准化后的 X_1, X_2, X_3, X_4 ;再对其进行主成分分析,提取累计方差贡献率达到 85% 的主成分。主成分分析结果显示:第 1 主成分累计方差贡献率已达 89.52%,可充分代表 4 项因子的主要信息,所得协方差矩阵特征值 $\lambda = (3.581, 0.227, 0.147, 0.045)$;第 1 主成分荷载向量分别为 $-0.933, 0.913, 0.974, 0.964$;将第 1 主成分荷载向量除以其特征值的算术平方根得到的各项系数分别为 $-0.493, 0.482, 0.515, 0.509$,由此构建美味系猕猴桃越冬冻害综合指标(I_h)计算公式如下:

$$I_h = -0.493 \times X_1 + 0.482 \times X_2 + 0.515 \times X_3 + 0.509 \times X_4. \quad (2)$$

由式 2 可见,美味系猕猴桃越冬冻害综合指标 I_h 与冬季最低气温(X_1)呈负相关关系,各栽培县冬季最低气温(X_1)越低, I_h 越大;综合指标 I_h 与其他 3 项致灾因子呈正相关关系,即 -8.0°C 以下低温日数(X_2)越长、 -8.0°C 以下负积温(X_3)越多、 -8.0°C 以下有害积寒(X_4)值越大, I_h 越大,与美味系猕猴桃越冬冻害发生的实际情况相符。

2.4 美味系猕猴桃越冬冻害综合指标分级

获取美味系猕猴桃越冬冻害样本的综合指标后,需对其进行分级,以区别轻度、中度、重度猕猴桃越冬冻害。K-means 聚类分析方法是典型的基于距离的聚类算法,既往学者在有关农作物或经济作物区划指标、灾害等级指标划分方面应用非常广泛^[18,24-25]。本文基于 SPSS 软件中的 K-means 聚类分析工具,对周至、眉县、鄂邑、桐柏 4 个栽培县 28 个美味系猕猴桃越冬冻害综合指标开展轻度、中度、重度 3 级分类。以 28 个样本的 I_h 值作为分析变量, L 作为标识变量。样本特点表现为轻度灾害居多,中度、重度灾情较少,另有两例无灾损个例。依据样本特点结合 K-means 聚类分析原理,设置 5 个聚类中心进行分类,无灾情、中度、重度 I_h 临界值各占据 1 个类中心值,轻度灾情占据相邻 2 个类中心值较低的 1 个。经过两次迭代获得美味系猕猴桃越冬冻害综合指标 I_h 划分的轻度、中度、重度灾害指标分别为 $-2.08 < I_h \leq 0.82, 0.82 < I_h \leq 2.15, I_h > 2.15$ 。

2.5 美味系猕猴桃越冬冻害指标验证

以陕西省武功、长安,河南省西峡,共 3 个美味系猕猴桃栽培县,1991 年、2002 年、2007 年、2009 年、2011 年、2015 年、2020 年共 7 个冬季 21 个猕猴桃越冬(冻害)个例作为检验样本,对美味系猕猴桃越冬冻害低温指标和综合指标进行检验(表 6)。

表 6 武功、长安、西峡 7 次美味系猕猴桃越冬冻害过程低温指标、综合指标与灾损率
Table 6 The low temperature indicators, comprehensive indicators and damage rates of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit at Wugong, Changan and Xixia

越冬期	武功			长安			西峡		
	$T_b/^\circ\text{C}$	I_h	$L/\%$	$T_b/^\circ\text{C}$	I_h	$L/\%$	$T_b/^\circ\text{C}$	I_h	$L/\%$
1991 年	-17.7	2.79	70	-17.3	2.94	70	-11.5	-1.10	30
2002 年	-12.1	0.22	30	-15.0	1.62	50	-8.0	-2.14	30
2007 年	-12.1	0.87	30	-12.7	0.63	30	-6.7	-2.43	0
2009 年	-9.0	-1.08	30	-10.6	-0.05	30	-7.5	-2.33	0
2011 年	-13.1	0.27	30	-12.7	-0.14	30	-6.2	-2.50	0
2015 年	-14.9	1.82	50	-17.4	2.70	70	-7.0	-2.39	0
2020 年	-12.9	1.34	30	-13.9	1.38	50	-7.0	-2.44	0

表6中,武功、长安、西峡在历史上7次猕猴桃大范围越冬冻害过程中,出现10个灾损率为30%的轻度灾害个例,其中最低气温最大值为 -8.0°C (西峡,2002年越冬期)、最小值为 -13.1°C (武功,2011年越冬期);综合指标最小为 -2.14 (西峡,2002年越冬期)、最大为 1.34 (武功,2020年越冬期)。出现3个灾损率为50%的中度灾害个例:武功县2015年越冬期冻害,最低气温为 -14.9°C 、综合指标为 1.82 ;长安区2002年越冬期冻害,最低气温为 -15.0°C 、综合指标为 1.62 ;长安区2020年越冬期冻害,最低气温为 -13.9°C 、综合指标为 1.38 。出现3个灾损率为70%的重度灾害个例:武功县1991年越冬期冻害,最低气温为 -17.7°C 、综合指标为 2.79 ;长安区1991年越冬期冻害,最低气温为 -17.3°C 、综合指标为 2.94 ;长安区2015年越冬期冻害,最低气温为 -17.4°C 、综合指标为 2.70 。综上,以低温指标(T_D): $-12.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -8.0^{\circ}\text{C}$, $-15.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -12.0^{\circ}\text{C}$, $T_D \leq -15.0^{\circ}\text{C}$ 划分的轻度、中度、重度美味系猕猴桃越冬冻害及21例灾情的总体准确率分别约为30%,67%,100%,62%。以综合指标(I_h): $-2.08 < I_h \leq 0.82$, $0.82 < I_h \leq 2.15$, $I_h > 2.15$ 划分的轻度、中度、重度美味系猕猴桃越冬冻害及21例灾情的总体准确率分别约为60%,100%,100%,81%。由此可见,本文所构建的美味系猕猴桃越冬冻害低温指标和综合指标基本与实情相符,且综合指标优于低温指标。

3 结论与讨论

本文基于对美味系猕猴桃越冬冻害大量历史灾情个例的调查分析和研究,确定美味系猕猴桃越冬冻害受害临界温度。采用归纳总结方法构建美味系猕猴桃越冬冻害低温指标,基于冻害过程最低气温,低于受害临界温度的低温日数、负积温、积寒4项要素,采用主成分分析和K-means聚类分析方法构建美味系猕猴桃越冬冻害综合指标,得到如下结论:

1) -8.0°C 是美味系猕猴桃越冬冻害发生的临界温度。美味系猕猴桃越冬冻害低温指标(T_D):轻度, $-12.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -8.0^{\circ}\text{C}$,可造成部分幼树或幼枝受冻;中度, $-15.0^{\circ}\text{C} < T_D \leq -12.0^{\circ}\text{C}$,可造成龄树大部分枝条和部分主干受冻;重度, $T_D \leq -15.0^{\circ}\text{C}$,可造成龄树几乎所有枝条和多数主杆受冻。

2) 综合考虑致使美味系猕猴桃越冬冻害发生

的各项气象要素,构建美味系猕猴桃越冬冻害综合指标(I_h):轻度, $-2.08 < I_h \leq 0.82$;中度, $0.82 < I_h \leq 2.15$;重度, $I_h > 2.15$ 。

3) 以低温指标和综合指标划分的美味系猕猴桃越冬冻害轻度、中度、重度等级与实际灾情基本相符,综合指标优于低温指标;低温指标可为美味系猕猴桃越冬冻害监测、预警提供参考依据,但综合指标在灾情等级识别、评估方面更优^[26]。

有关猕猴桃越冬冻害指标的研究尚比较薄弱,目前多为经验总结,且大多依据的是气象站数据。实际已有文献指出猕猴桃果园的温度与所处县气象站的温度存在差异^[12,27]。因而,在下一步的研究中可参考研究较多的苹果主要气象灾害指标,采用猕猴桃园内小气候站资料构建指标,或建立猕猴桃园内小气候站资料与县气象站资料之间的关系,对现有指标进行订正,提高相关指标应用精确度和价值^[28-31]。

本研究在猕猴桃越冬冻害低温指标和综合指标验证过程中,均表现为轻度冻害准确率最低,同时也出现多例用最低气温划分为中度冻害的个例实际灾损是轻度级别。进一步分析和总结认为,猕猴桃越冬冻害(尤其是轻度越冬冻害)的成灾与否、灾损程度,与当年猕猴桃挂果量(影响冬季树体强弱)、进入休眠期时间早晚、营养积累是否充足、田间管理模式,是否采取防冻措施等有密切关系。因此,下一步研究工作应结合实验室和大田的对比试验,对美味系猕猴桃越冬冻害成灾机理进行深入研究,并可依据相关研究成果从果树养分供给,田间管理等多方面提出切实有效的灾害防御措施。

参考文献

- [1] 张清明. 猕猴桃冻害及其防御. 西北园艺, 2008(10): 44-45. Zhang Q M. Freeze injury of kiwifruit and its prevention. *Northwest Horticulture*, 2008(10): 44-45.
- [2] FAO. FAO Statistics 1993-2013. <http://faostat3.fao.org/home/E/>, 2015-12-02.
- [3] 崔致学. 中国猕猴桃. 济南: 山东科技出版社, 1993. Cui Z X. Chinese Kiwifruit. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1993.
- [4] 屈振江, 周广胜. 中国主栽猕猴桃品种的气候适宜性区划. 中国农业气象, 2017, 38(4): 257-266. Qu Z J, Zhou G S. Regionalization of climatic suitability for major kiwifruit cultivars in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(4): 257-266.
- [5] 明春日月. 全国猕猴桃产地分布及种植、发展情况. <http://>

- www.360doc.com/content/19/0619/14/14636198_843517242.shtml, 2019-06-19.
- Ming C R Y. Distribution, Planting and Development of Kiwifruit in China. http://www.360doc.com/content/19/0619/14/14636198_843517242.shtml, 2019-06-19.
- [6] 刘占德, 郁俊谊, 安成立, 等. 中国猕猴桃主产区的冻害调查及其应对措施. 北方园艺, 2012(12): 64-65.
- Liu Z D, Yu J Y, An C L, et al. Investigation of freeze injury in main kiwifruit producing areas in China and its countermeasures. *Northern Horticulture*, 2012(12): 64-65.
- [7] 赵菊琴. 猕猴桃园的冻害调查及防御措施. 山西果树, 2014(2): 36-37.
- Zhao J Q. Investigation and prevention measures of freeze injury in kiwifruit orchard. *Shanxi Fruits*, 2014(2): 36-37.
- [8] 杨婷婷. 眉县猕猴桃冻害分析与防御方法初探. 陕西气象, 2020(1): 31-34.
- Yang T T. Analysis and defense of kiwifruit freezing damage in Meixian County. *Shaanxi Meteorology*, 2020(1): 31-34.
- [9] 闵艳娥, 李小功, 赵爱香, 等. 渭南地区猕猴桃树冻害发生的因素及关键防治措施. 农业科技通讯, 2019(2): 264-265.
- Min Y E, Li X G, Zhao A X, et al. Occurrence factors and key control measures of kiwifruit freezing injury in Weinan area. *Agricultural Science and Technology Communication*, 2019(2): 264-265.
- [10] 屈振江, 柏秦凤, 梁轶, 等. 气候变化对陕西猕猴桃主要气象灾害风险的影响预估. 果树学报, 2014, 31(5): 873-878.
- Qu Z J, Bai Q F, Liang Y, et al. Potential impacts of climate change on the main meteorological disaster risk of kiwifruit in Shaanxi province. *Journal of Fruit Science*, 2014, 31(5): 873-878.
- [11] 王玉洁, 周波涛, 任玉玉, 等. 全球气候变化对我国气候安全影响的思考. 应用气象学报, 2016, 27(6): 750-758.
- Wang Y J, Zhou B T, Ren Y Y, et al. Impacts of global climate change on China's climate security. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(6): 750-758.
- [12] 赵英杰, 颜世伟, 牛雨佳, 等. 秦岭北麓猕猴桃越冬冻害预防. 西北园艺, 2018(12): 10-12.
- Zhao Y J, Yan S W, Niu Y J, et al. Prevention of kiwifruit overwintering freezing injury in the northern foot of Qinling Mountains. *Northwest Horticulture*, 2018(12): 10-12.
- [13] 黄长社, 王文燕, 王丽, 等. 周至猕猴桃冻害气候特征分析及防御对策. 甘肃科学学报, 2017, 29(6): 46-49.
- Huang C S, Wang W Y, Wang L, et al. Analysis and defending countermeasures of Zhouzhi kiwifruit freeze injury climatic characteristics. *Journal of Gansu Sciences*, 2017, 29(6): 46-49.
- [14] 齐秀娟, 方金豹, 赵长竹. 2009年郑州地区猕猴桃冻害调查与原因分析. 果树学报, 2011, 28(1): 55-60.
- Qi X J, Fang J B, Zhao C Z. Freeze injury investigation of kiwifruit in Zhengzhou area in 2009. *Journal of Fruit Science*, 2011, 28(1): 55-60.
- [15] 张芒果, 李雪宁, 尚韬, 等. 猕猴桃冻害的发生因素及防治技术. 防灾减灾, 2018(5): 26-28.
- Zhang M G, Li X N, Shang T, et al. Occurrence factors and control techniques of kiwifruit freezing injury. *Disaster Prevention and Reduction*, 2018(5): 26-28.
- [16] 安成立, 刘占德, 刘旭峰, 等. 猕猴桃不同树龄冻害调研报告. 北方园艺, 2011(18): 44-47.
- An C L, Liu Z D, Liu X F, et al. Investigation report on freeze injury of kiwifruit at different ages. *Northern Horticulture*, 2011(18): 44-47.
- [17] 李广文, 贺瑶, 李红娟, 等. 陕西宝鸡产区猕猴桃冻害发生规律调查. 西北园艺, 2018(4): 48-51.
- Li G W, He Y, Li H J, et al. Investigation on occurrence regularity of kiwifruit freezing injury in Baoji region of Shaanxi Province. *Northwest Horticulture*, 2018(4): 48-51.
- [18] 杨凯, 陈彬彬, 陈慧, 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.
- Yang K, Chen B B, Chen H, et al. Comprehensive climatic index and grade classification of cold damage for Taiwan green jujube in Fujian. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 427-434.
- [19] 裴浩, 郝璐, 韩经纬. 近40年内蒙古气候降水变化趋势. 应用气象学报, 2012, 23(5): 543-550.
- Pei H, Hao L, Han J W. Pentad precipitation changes during recent 40 years in Inner Mongolia. *J Appl Meteor Sci*, 2012, 23(5): 543-550.
- [20] 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.
- Bai Q F. Research on Disaster-caused Climatic Factors and Comprehensive Index of Cold Damage in South China. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2008.
- [21] 王景红, 柏秦凤, 梁轶, 等. 2013年陕西苹果花期冻害气象条件分析及受冻指标研究. 果树学报, 2015, 32(1): 100-107.
- Wang J H, Bai Q F, Liang Y, et al. Study on freezing index and weather conditions causing Shaanxi apple florescence freezing injury in 2013. *Journal of Fruit Science*, 2015, 32(1): 100-107.
- [22] 段晓凤, 朱永宁, 张磊, 等. 宁夏枸杞花期霜冻指标试验研究. 应用气象学报, 2020, 31(4): 417-426.
- Duan X F, Zhu Y N, Zhang L, et al. Experimental research on frost indexes for Lycium barbarum flowering phase. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 417-426.
- [23] 王景红, 梁轶, 柏秦凤, 等. 陕西主要果树气候适宜性与气象灾害风险区划图集. 西安: 陕西科学技术出版社, 2012.
- Wang J H, Liang Y, Bai Q F, et al. Atlas of Climatic Suitability and Meteorological Disaster Risk Zoning of Main Fruit Trees in Shaanxi Province. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2012.
- [24] 李颖, 赵国强, 陈怀亮, 等. 基于冬小麦农业气候分区的 WO-FOST 模型参数标定. 应用气象学报, 2021, 32(1): 38-51.
- Li Y, Zhao G Q, Chen H L, et al. WOFOST model parameter calibration based on Agro-climatic division of winter wheat. *J*

- Appl Meteor Sci*, 2021, 32(1): 38-51.
- [25] 霍治国, 尚莹, 邬定荣, 等. 中国小麦干热风灾害研究进展. 应用气象学报, 2019, 30(2): 129-141.
Huo Z G, Shang Y, Wu D R, et al. Review on disaster of hot dry wind for wheat in China. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(2): 129-141.
- [26] 吴门新, 庄立伟, 侯英雨, 等. 中国农业气象业务系统(CAgMSS)设计与实现. 应用气象学报, 2019, 30(5): 513-527.
Wu M X, Zhuang L W, Hou Y Y, et al. The design and implementation of China Agricultural Meteorological Service System(CAgMSS). *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(5): 513-527.
- [27] 李艳莉, 郭新, 符显, 等. 陕西关中地区猕猴桃园小气候特征分析及高温热害指标研究. 陕西气象, 2021(1): 40-43.
Li Y L, Guo X, Fu Y, et al. Analysis of microclimate characteristics and heat damage index of kiwifruit orchard in Guanzhong area of Shaanxi Province. *Shaanxi Meteorology*, 2021(1): 40-43.
- [28] 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等. 中国北方苹果干旱等级指标构建及危险性评价. 应用气象学报, 2021, 32(1): 25-37.
Yang J Y, Huo Z G, Wang P J, et al. Evaluation index construction and hazard risk assessment on apple drought in northern China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(1): 25-37.
- [29] 屈振江, 郑小华, 王景红, 等. 渭北旱塬苹果园内外温度变化特征研究. 干旱区地理, 2016, 39(2): 301-308.
Qu Z J, Zheng X H, Wang J H, et al. Characteristics of temperature variation in and out of apple orchard in Weibei Plateau. *Arid Land Geography*, 2016, 39(2): 301-308.
- [30] 屈振江, 尚小宁, 王景红, 等. 黄土高原两种树形苹果园花期温度垂直变化特征及预测. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3405-3412.
Qu Z J, Shang X N, Wang J H, et al. Vertical variation characteristics and prediction of temperature in two tree apple orchards at flowering stage on Loess Plateau. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3405-3412.
- [31] 王培娟, 唐俊贤, 金志凤, 等. 中国茶树春霜冻害研究进展. 应用气象学报, 2021, 32(2): 129-145.
Wang P J, Tang J X, Jin Z F, et al. Review on spring frost disaster for tea plant in China. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(2): 129-145.

Freezing Injury Indicator of Tasty Kiwifruit During Overwintering Period

Bai Qinfeng¹⁾ Wang Jinghong¹⁾ Li Hualong¹⁾ Zhang Weimin¹⁾

Guo Jianping²⁾ Zhang Tao¹⁾ He Chenxin³⁾

¹⁾ (Shaanxi Meteorological Service Center of Agricultural Remote Sensing and Economic Crops, Xi'an 710016)

²⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

³⁾ (Weinan Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Weinan 714000)

Abstract

China has the largest artificial planting area of kiwifruit, of which 67% is tasty kiwifruit. Tasty kiwifruit is mainly distributed in the north foot of Qinling Mountains in Shaanxi Province (about 40% of the national kiwifruit industry scale), and Funiu Mountain and Tongbai Mountain in Henan Province (about 20% of the national kiwifruit industry scale). These two producing areas locate in the northern edge of China's kiwifruit planting area, where the risk of overwintering freezing injury is high to cause great economic losses to fruit farmers. Therefore, it is especially important to study the freezing injury indicator of tasty kiwifruit for the introduction and expansion of tasty kiwifruit, disaster prevention and mitigation, and stable development of the industry.

Through disaster investigation, expert interview, data research and other methods, 7 large-scale freezing injury cases of tasty kiwifruit in 1991, 2002, 2007, 2009, 2011, 2015 and 2020 are selected. The disaster cases of four counties, namely Huyi, Zhouzhi, Meixian and Tongbai are used as samples. The critical occurrence indicator of the overwintering freezing injury of tasty kiwifruit is determined as -8.0°C . The low temperature indicator (T_{D}) of mild, moderate and severe freezing injury of tasty kiwifruit are determined as follows: $-12.0^{\circ}\text{C} < T_{\text{D}} \leq -8.0^{\circ}\text{C}$, $-15.0^{\circ}\text{C} < T_{\text{D}} \leq -12.0^{\circ}\text{C}$, and $T_{\text{D}} \leq -15.0^{\circ}\text{C}$. Four factors are defined as: Winter minimum temperature (X_1), days of low temperature below -8.0°C (X_2), absolute value of negative accumulated temperature below -8°C (X_3), and process harmful accumulated cold below -8°C (X_4). Using principal component analysis and K-means clustering analysis, the comprehensive indicator (I_{h}) of tasty kiwifruit overwintering freezing injury is constructed, and the ranges of I_{h} for different levels of freezing injury are as follows: $-2.08 < I_{\text{h}} \leq 0.82$ for mild freezing injury, $0.82 < I_{\text{h}} \leq 2.15$ for moderate freezing injury, and $I_{\text{h}} > 2.15$ for severe freezing injury. The indicators mentioned above are verified by the freezing injury cases of tasty kiwifruit in Changan, Wugong and Xixia counties. The results show that low temperature indicators and comprehensive indicators of overwintering freezing injury of tasty kiwifruit are basically consistent with the actual situation. The results can support the prevention and evaluation of the freezing injury of tasty kiwifruit during overwintering period, and also can provide reference for industrial layout optimization and introduction of tasty kiwifruit in China.

Key words: tasty kiwifruit; overwintering freezing injury; indicator; principal component analysis; K-means clustering analysis