

## 北方苹果干旱触发判别方法

杨建莹<sup>1</sup>, 霍治国<sup>1,2\*</sup>, 徐建文<sup>3</sup>, 王培娟<sup>1</sup>, 邬定荣<sup>1</sup>, 毛红丹<sup>1</sup>, 孔 瑞<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院生态与农业气象研究所, 北京 100081; 2. 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; 3. 大连市气象服务中心, 大连 116001)

**摘 要:** 基于小样本历史灾害数据和长序列气象、林果生长数据的林果灾害判别, 对目前历史灾害数据匮乏的林果等经济作物气象灾害研究具有重要意义。该研究以中国陕西省富士系苹果干旱灾害为例, 利用气象资料、苹果干旱灾情史料和富士系苹果发育期资料, 充分考虑苹果不同发育阶段的水分需求和降水供给情况, 以及前期水分盈亏状况对当前发育阶段苹果生长的影响, 在水分盈亏指数计算的基础上, 构建苹果干旱指数。通过概率分析、K-Means 聚类、欧式距离等方法, 厘定陕西省富士系苹果的干旱触发阈值。采用致灾因子序列对比分析、预留样本验证相结合的方法, 验证苹果干旱触发阈值有效性。结果表明: 1) 苹果干旱触发阈值分别为: 苹果果树萌动-萌芽期 0.87, 萌芽-盛花期 0.84, 盛花-成熟期 0.73; 2) 基于阈值提取的苹果干旱年份的干旱指数序列与历史灾害样本干旱指数序列具有同一性; 预留独立样本指标判别准确率为 85.58%; 典型站点长时间序列检验判别结果准确率为 80.95%。研究结果可为林果灾害指标研究提供技术支撑。

**关键词:** 干旱; 气象; 苹果; 阈值厘定; 有效性检验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.013

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-18-0099-10

杨建莹, 霍治国, 徐建文, 等. 北方苹果干旱触发判别方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 99-108. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.013 <http://www.tcsae.org>

Yang Jianying, Huo Zhiguo, Xu Jianwen, et al. Method for trigger identification of apple drought in northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 99-108. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.18.013 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

干旱是中国最主要的农业气象灾害, 发生频率高、致灾范围广、持续时间长、损失影响大。中国常年干旱受灾面积约占气象灾害总受灾面积的 60%以上, 平均每年农业干旱面积在 2 000~3 000 万  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。林果干旱是农业干旱的一种, 是指在林果生长发育过程中, 因降水不足并得不到适时适量的灌溉致使供水不能满足林果的正常需水而造成损伤<sup>[2]</sup>。近 50 年来中国干旱面积迅速扩大, 极端干旱事件频发<sup>[3-5]</sup>, 加剧了农业干旱的形成, 给林果生产带来了严重影响。

农业干旱的发生时间、发展过程和影响范围, 可通过构建干旱指标来综合判别和表达。从气象、土壤条件、作物特性出发, 以降水<sup>[6]</sup>、蒸发<sup>[7]</sup>、湿度和土壤含水率<sup>[8]</sup>等指标作为主要数据源的区域农业干旱研究相对丰富, 干旱判别指标和方法在农田作物干旱识别<sup>[9-10]</sup>、时空发展趋势<sup>[11-12]</sup>、灾损量化中应用较为广泛。常用的农业干旱判别指数包括降水量距平百分率 (Percentage of precipitation

anomalies, Pa)<sup>[13]</sup>、土壤相对湿度 (Relative soil moisture, Rsm)<sup>[14-15]</sup>、连续无有效降水 (降雪、积雪) 日数 (continuous days without available precipitation, Dnp)<sup>[16]</sup>、作物水分亏缺指数 (Crop Water Deficit Index, CWDI)<sup>[17-18]</sup>等。针对不同作物, 采用的干旱指标也各不相同。2015 年发布的国家标准《农业干旱等级》(GB/T 32136—2015)<sup>[19]</sup>中, 采用作物水分亏缺距平指数、土壤相对湿度指数、农田与作物干旱形态指标来进行农业干旱的界定。其中, 作物水分亏缺距平指数>35 时认为发生农业干旱, 涉及的主要农作物包括小麦、玉米、水稻、棉花、大豆、马铃薯等。

苹果是中国北方地区农业产业中经济效益较高的林果。然而, 受大陆性季风气候影响, 降水时空分布不均, 且 80% 的果园无灌溉条件, 苹果生产过程水分供需矛盾突出<sup>[20]</sup>, 制约光热和土肥资源潜力的有效发挥<sup>[21]</sup>, 对果树光合产物形成和积累产生显著影响<sup>[22-23]</sup>。与农田作物农业干旱识别指标相比较, 苹果干旱识别研究具有特殊性。苹果生长周期内耗水较多, 可达 1 000 mm 以上, 盛花-成熟期阶段是果树关键需水阶段, 需水量一般 500 mm 以上<sup>[20]</sup>; 根系发达, 对地表水分拦截、保持和利用作用显著, 对深层土壤水分吸收能力强。与农田作物相比, 苹果对水分和养分的利用效率, 以及对干旱天气的抵御能力均高于农田作物。目前, 国内外对苹果干旱的研究, 主要是基于果园控制试验, 研究干旱条件对苹果生理生化<sup>[21,24]</sup>、产量<sup>[25]</sup>、品质<sup>[26]</sup>的影响。苹果干旱判别指标研

收稿日期: 2020-06-11 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC1502801; 2019YFD1002203); 中国气象科学研究院科技发展基金 (2019KJ008)

作者简介: 杨建莹, 副研究员, 主要从事农业气象灾害风险预测与评估研究。Email: jyayang@cma.gov.cn

\*通信作者: 霍治国, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业气象灾害、病虫害预测与评估研究。Email: huozg@cma.gov.cn

究还相对较少。马延庆等<sup>[27]</sup>基于干燥度、土壤含水率、果园蒸散量等农业干旱指标综合分析了苹果干旱发生的主要时段和苹果的需水耗水规律；王景红等<sup>[28]</sup>结合苹果不同发育阶段的水分供需特征和气象干旱强度，构建了黄土高原区富士系苹果干旱指数，评价了陕西省苹果干旱风险；程雪等<sup>[20]</sup>利用该指标研究了中国北方地区苹果干旱时空分布特征。上述指标能较好地表征苹果不同发育阶段的水分供需特征及区域尺度苹果干旱风险的差异，但苹果干旱发生的临界气象条件及触发阈值尚未明确，苹果干旱判识针对性有所不足。相关研究表明，适度干旱胁迫会促进同化物从营养器官向生殖器官转移，产生增产节水效应的同时，增强苹果品质<sup>[29]</sup>；但若干旱天气持续加强且无补充灌溉，则发生苹果干旱，影响果实产量和品质。明确苹果干旱触发阈值、准确判识苹果干旱的发生发展，对针对性的开展苹果防灾减灾意义重大。

历史灾害数据对于理解区域灾害系统的相互作用机制有着重要的作用。基于历史灾害样本重建与再分析的农业气象指标构建方法，在农业洪涝<sup>[30]</sup>、涝渍<sup>[31-32]</sup>、高温热害<sup>[33]</sup>、冷害<sup>[34]</sup>等灾害触发阈值研究中得到应用和证实。然而，与农田作物相比，林果等经济作物的历史灾害记录相对匮乏，单纯采用灾情反演与再分析的灾害研究方法存在样本不足、精度不高等问题。因此，如何综合利用小样本历史灾害数据、长序列气象和林果生长数据，实现区域林果气象灾害的阈值厘定和判识，对林果等经济作物气象灾害的监测预警与防控有重要意义。

鉴于此，本文以陕西富士系苹果干旱灾害为例，参考农田作物农业干旱指数构建方法，在综合考虑苹果不同发育阶段水分供需的基础上，构建能表征苹果阶段水分状况的苹果干旱指数；通过灾情反演、指数提取、聚类分析和样本距离等方法，研发基于小样本灾害数据、长序列历史气象数据和林果生长数据的灾害判识方法，厘定陕西富士系苹果的干旱触发阈值，并采用致灾因子序列对比分析、预留样本验证相结合的方法，验证苹果干旱触发指标有效性。研究结果可为林果等经济作物灾害判识指标构建提供范式，为针对性地开展林果干旱防灾减灾提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

陕西省内 35 个国家级基本气象站 1981—2018 年逐日气象资料来源于国家气象信息中心，包括逐日的降水量、平均风速、平均温度、日最高气温和日最低气温等，对其中个别缺测值采用该日相邻两日该要素的平均值替代<sup>[35]</sup>。苹果发育期包括果树萌动期、萌芽期、盛花期和成熟期，其中苹果果树萌动期以平均温度稳定通过 3℃ 为依据确定<sup>[36]</sup>。苹果萌芽期、盛花期和成熟期数据来源于《中国农业气象资源图集》<sup>[37]</sup>，通过纸质资料扫描、ArcGIS 地理校正等方法，对发育期资料进行数字化。提取等值线附近气象站点发育期日期，利用 Kriging 插值结合物候定律法<sup>[38]</sup>将苹果发育期数据插值到研究区域内的 35 个气象站点。苹果干旱灾情资料来源于《中国气象灾害大典》（陕西）<sup>[39]</sup>、《中国气象灾害年鉴》<sup>[40]</sup>、苹果

灾情调查、果树灾害专题调查，以及果业基地县县志、果业基地县民政部门的灾情记录以及媒体报道。

### 1.2 苹果干旱指数构建

参考农田作物（如小麦、玉米等）干旱指标构建方法，充分考虑苹果不同发育阶段的水分需求和降水供给情况，以及前期水分盈亏状况对当前发育阶段苹果生长的影响，在苹果不同发育阶段水分盈亏指数计算的基础上，构建苹果干旱指数。

#### 1.2.1 水分盈亏指数及其计算方法

借鉴农作物干旱识别指标，水分盈亏指数计算公式如下所示。

$$WD_i = \frac{ET_{ci} - P_i}{ET_{ci}} \quad (1)$$

式中， $WD_i$  为某年某站点苹果第  $i$  个发育阶段内的水分盈亏指数； $ET_{ci}$  和  $P_i$  分别为某年某站点苹果第  $i$  个发育阶段需水量和降水量，mm。作物需水量( $ET_c$ )采用 FAO 推荐的“参考作物蒸散量乘以作物系数法”计算苹果各发育阶段需水量，具体计算公式如下

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (2)$$

式中  $ET_c$  为苹果某一发育阶段的需水量，mm； $ET_0$  为对应时段的参考作物蒸散量，mm，计算方法采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[41]</sup>； $K_c$  为苹果该发育阶段作物系数，参考 1998 年 FAO-56 推荐的分段单值平均作物系数法<sup>[41]</sup>和相关文献<sup>[42-43]</sup>，苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期 3 个发育阶段的  $K_c$  分别为 0.65、0.8 和 0.95。

#### 1.2.2 苹果干旱指数及其计算方法

果树萌动-萌芽期和萌芽-盛花期一般历时约 30~40 d，当前发育阶段之前的降水条件分别对果树萌动-萌芽期和萌芽-盛花期的干旱形成影响较大；盛花-成熟期历时 60~100 d，该阶段虽然处于一年中的水分充盈期，但如遇干旱年，果树盛花期前的水分条件依然影响当前阶段的水分供给。参考国家标准《农业干旱等级》(GB/T 32136—2015)中作物水分亏缺指数 CWDI (Crop Water Deficit Index) 的构建方法，以及林果作物与农田作物在生理需水、根系水分吸收及土壤深层水分利用上的差异性，在构建苹果干旱指数时，考虑当前阶段及前 60 d 水分盈亏情况。采用权重递减的思路<sup>[44]</sup>，即假定当前的水分盈亏指数对该阶段的干旱指数贡献最大，随着时间的前移，过去 60 d 的水分盈亏指数对当前阶段的干旱指数随时间距离递减。考虑到水分盈亏指数适用于旬以上尺度的干旱监测和评估，故以 10 d 为步长，累计统计过去 60 d (即 6 个步长) 的水分盈亏指数，并设置所有因子总权重为 1。 $WD_i$  的权重系数为 7/28； $WD_{i-1}$  即前 1~10 d 的水分盈亏指数，它的权重系数为 6/28； $WD_{i-2}$  即前 11~20 d 的水分盈亏指数，它的权重系数为 5/28；以此类推。

具体公式如下

$$DI_i = \sum_{k=1}^7 \frac{k}{28} WD_{i+k-7} \quad (3)$$

式中  $DI_i$  为第  $i$  阶段的苹果干旱指数, 最大值为 1;  $k$  为计算水分盈亏指数的步长个数, 为 1~7。

### 1.3 历史灾害样本反演

根据灾情记录中的苹果干旱发生时间、地点, 结合苹果发育期资料, 分别反演对应年份、对应气象站点、对应发育阶段 (苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期) 的苹果干旱指数, 构建苹果 3 个发育阶段的灾害样本干旱指数集合。例如灾情记录为“1994 年 6—9 月, 受干旱影响, 陕西礼泉县全县果园受灾, 果树整体发育生长缓慢, 生理性落叶、落果”。根据苹果发育期资料, 6—9 月苹果处于盛花-成熟期间, 计算 1994 年礼泉县盛花-成熟期苹果干旱指数为 0.79, 因此反演得到该样本为: 1994, 礼泉, 盛花-成熟期, 0.79。同理, 反演得到历史苹果干旱实际受灾样本序列 3 组共 130 个, 其中苹果果树萌动-萌芽期干旱样本 19 个, 萌芽-盛花期干旱样本 41 个、盛花-成熟期干旱样本 70 个。

在以往基于历史灾害样本重建与再分析的农业气象灾害研究中, 通常预留 10%~20% 的独立样本进行阈值验证, 阈值厘定样本数量通常为 10~50 个<sup>[30-34]</sup>。为研发基于小样本灾害数据的林果干旱阈值判识方法, 本文随机选取苹果各发育阶段灾害总样本量的 20% 用于苹果干旱触发阈值厘定, 预留 80% 灾害样本用于阈值的验证。苹果干旱样本数量详细信息如表 1 所示。

表 1 苹果干旱样本数量详细信息

Table 1 Detailed information in number of apple drought samples

发育阶段 Phenological phase	总样本数 Total number of samples	阈值厘定样本 Threshold determination sample	验证样本 Verification samples
果树萌动-萌芽期 Tree germinating to flower budding	19	4	15
萌芽-盛花期 Flower budding to full bloom	41	8	33
盛花-成熟期 Full bloom to mature	70	14	56

### 1.4 苹果干旱触发阈值厘定

#### 1.4.1 苹果干旱初始判识指标

概率密度或累积概率函数可以表征总体样本特征, 天气学中, 常被应用于定义特定地区和时间的极端天气事件<sup>[45]</sup>。本文采用累积概率密度表征 1981—2018 年苹果各发育期干旱指数的总体分布。计算得到 1981—2018 年 35 个气象站点苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期干旱指数样本各 1 330 个。假设苹果各发育阶段的 1 330 个干旱指数为连续型随机变量, 分别对干旱指数总体样本进行累计概率拟合。以 5% 为步长, 计算总体苹果干旱指数累积概率下的历史灾害样本覆盖率 ( $R$ )。以  $R>0$  的起始值所对应的总体样本累积概率反函数值, 作为该发育阶段苹果干旱的初始判识指标, 认为只有干旱指数值达到初始判识指标, 才有可能发生苹果干旱事件。灾害样本覆盖率 ( $R_i$ ) 的计算方法如下式所示

$$R_i = \frac{n_i}{N_i} \quad (4)$$

式中  $R_i$  为苹果第  $i$  个发育阶段的灾害样本覆盖率;  $n_i$  为该发育阶段达到 1981—2018 年总体样本某一累积概率的历史灾害样本数;  $N_i$  为苹果第  $i$  个发育阶段历史灾害样本总数。

#### 1.4.2 触发阈值厘定方法

以初始判识指标为基础, 将 1981—2018 年干旱指数大于初始判识指标的干旱指数值定义为聚类样本。分别对苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期聚类样本进行分类, 判识聚类样本中心点; 计算历史灾害样本干旱指数与聚类中心点距离, 以最小距离对应的聚类中心点作为该阶段苹果干旱发生的触发阈值。

##### 1) 基于 K-Means 算法的聚类中心点识别

聚类分析是依据研究对象的个体特征建立分类的多元统计分析方法。它能够一批样本数据按照性质上的亲疏程度对其进行分类, 在经济、管理、社会学等领域都有广泛应用<sup>[46]</sup>。K-Means 算法是常用的聚类分析方法之一<sup>[47]</sup>, 其基本思想是, 对于给定的样本集, 按照样本之间的距离大小, 将样本集划分为  $K$  个簇。让簇内的点尽量紧密的连在一起, 而让簇间的距离尽量的大。假设簇划分为 ( $C_1, C_2, \dots, C_K$ ), 则目标是最小化平方误差  $E$

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} \|x - u_i\|^2 \quad (5)$$

式中  $K$  为聚类数;  $x$  为簇  $C_i$  的样本点;  $u_i$  是簇  $C_i$  的均值向量, 也称为聚类中心点, 表达式为

$$u_i = \frac{1}{|C_i|} \sum_{x \in C_i} x \quad (6)$$

本文采用 K-Means 算法, 对 1981—2018 年苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期聚类样本进行分类, 判识聚类样本中心点。

##### 2) 基于最小距离的干旱触发阈值厘定

欧式距离一定程度上能表征样本间的相似程度, 是分类研究中的常用计算方法。本文采用欧式距离公式计算苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期历史灾害样本与聚类样本中心点距离, 判识历史灾害样本所属聚类别, 以最小欧式距离对应的聚类中心点, 作为该阶段苹果干旱发生的触发阈值。

欧式距离公式<sup>[48]</sup>计算方法为

$$d_i = [\sum_{u=1}^p |Z_i - Z_u|^2]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中  $d_i$  是第  $i$  个灾害样本和聚类中心点的欧式距离;  $p$  是灾害样本数量;  $Z_i$  是第  $i$  个样本的干旱指数值;  $Z_u$  是聚类中心点对应的干旱指数值。

### 1.5 苹果干旱阈值合理性检验

#### 1.5.1 致灾因子 (干旱指数) 序列的统计学检验

计算 1981—2018 年干旱指数, 基于苹果干旱触发阈值, 将提取得到的干旱年份干旱指数序列与历史记录反演得到的灾害样本干旱指数序列作对比, 计算干旱指数分布频率、平均值和标准差, 并对 3 个发育阶段的共 3 组样本集合做  $T$  检验, 验证是否来着同一整体, 评估基于阈值提取的苹果干旱年份的干旱指数序列与历史灾害样本干旱指数序列是否具有同一性。

### 1.5.2 预留独立样本检验

#### 1) 历史灾害样本判识准确率检验

参考水稻洪涝、高温热害等级阈值检验方法<sup>[30,33]</sup>, 采用预留验证样本, 依据苹果干旱触发阈值, 计算苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期干旱判识准确率, 进行不同发育阶段干旱判别结果检验。

#### 2) 典型站干旱判识检验

采用单一站点 1981—2018 年干旱指数值为典型站灾害判识序列, 根据验证样本中记载的苹果干旱发生年份和发育阶段, 对照检验基于干旱指标计算的干旱判识结果, 验证其与历史记录是否一致。站点选择依据以下原则: ①该站常年有苹果种植, 是苹果生产的典型区; ②该站历史苹果干旱灾情记录相对详实。

## 2 结果与分析

### 2.1 苹果干旱触发阈值厘定

#### 2.1.1 初始判识指标的确定

1981—2018 年干旱指数累积概率及历史灾害样本干旱指数分布如图 1 所示。以 1981—2018 年干旱指数序列的 5%累积概率为步长, 逐步计算不同累积概率下的灾害样本覆盖率 ( $R$ ), 其结果如图 2 所示。随着干旱指数累积概率的增加, 干旱指数 (Drought Index, DI) 逐渐增大,

灾害样本覆盖率 ( $R$ ) 逐渐增大。以苹果果树萌动-萌芽期初始判识指标确定过程为例, 初始判识指标的确定苹果果树萌动-萌芽期的 4 个历史灾害样本干旱指数均分布于 1981—2018 年干旱指数序列的 75%累积概率以上, 80%、85%和 90%累积概率下的  $R$  值分别为 25%、25%和 100%, 即当苹果干旱指数达到 1981—2018 年干旱指数序列的 80%和 85%反函数值时, 25%的历史灾害样本干旱指数值小于该指标, 不能被判识; 当达到 90%反函数值时, 全部历史灾害样本的干旱指数值在该判识指标以下, 均无法通过该指标得到判识。以 5%累积概率为步长, 判断  $R>0$  的起始值为 1981—2018 年干旱指数的 75%累积概率, 全部历史灾害样本干旱指数值均大于该指标, 均可得到判识。以 75%累积概率反函数值作为该发育阶段苹果干旱的初始判识指标, 判定 1981—2018 年干旱指数序列的 75%累积概率反函数值 (0.74) 作为该发育阶段苹果干旱的初始判识指标。同理, 判定苹果萌芽-盛花期、盛花-成熟期的干旱初步判识指标为 1981—2018 年干旱指数 80%、70%累积概率对应干旱指数值, 即 0.75、0.50。苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期干旱的初始判识指标分别为 0.74、0.75、0.50, 只有苹果干旱指数达到 0.74、0.75 和 0.50 时, 苹果干旱才可能发生。

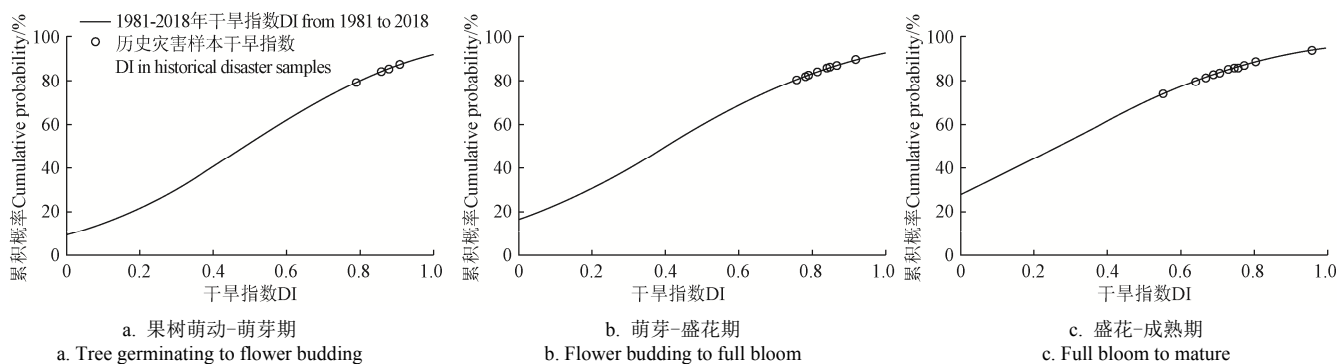


图 1 不同发育期 1981—2018 年干旱指数 (DI) 累积概率及历史灾害样本干旱指数分布

Fig.1 Cumulative probability of apple Drought Index (DI) from 1981 to 2018 and distribution of DI in historical disaster samples at different growth stages

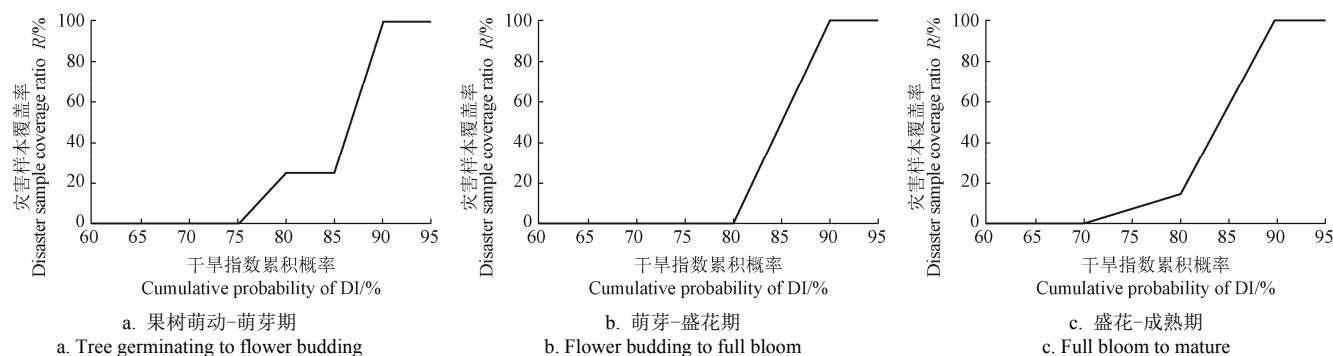


图 2 不同发育期 1981—2018 年干旱指数累积概率下历史灾害样本覆盖率 ( $R$ ) 变化

Fig.2 Changes of historical disaster sample coverage ratio ( $R$ ) under different cumulative probabilities of apple Drought Index (DI) from 1981 to 2018 at different growth stages

#### 2.1.2 阈值厘定

以 0.74、0.75、0.50 为初始判识指标, 将 1981—2018 年干旱指数大于初始判识指标的干旱指数值定义为聚类样本, 采用 K-Mean 聚类将苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-

盛花期、盛花-成熟期聚类样本进行分类。参考 K-Mean 聚类算法的使用和适用原则, 将苹果不同发育阶段聚类样本分为 5 个聚类。聚类中心点及方差分析如表 2 所示。对 1981—2018 年苹果果树萌动-萌芽期干旱指数  $>0.74$  的



干旱指数样本进行聚类,得到的聚类中心点分别为: 0.81、0.87、0.92、0.96、0.99; 分别对 1981—2018 年萌芽-盛花期干旱指数>0.75 和盛花-成熟期干旱指数>0.50 的干旱指数进行聚类,得到聚类中心点分别为 0.78、0.84、0.90、0.95、0.99 和 0.65、0.73、0.80、0.86、0.91。组间方差分别为 0.198、0.228、0.378, 大于组内方差 ( $P<0.01$ ) (表 2)。

表 2 聚类中心点及方差分析  
Table 2 Cluster center point and variance analysis

发育阶段 Phenological phase	聚类中心点 Clusters center point					方差分析 Variance analysis	
						组间方差	组内方差
果树萌动-萌芽期 Tree germinating to flower budding	0.81	0.87	0.92	0.96	0.99	0.198	<0.01
萌芽-盛花期 Flower budding to full bloom	0.78	0.84	0.90	0.95	0.99	0.228	<0.01
盛花-成熟期 Full bloom to mature	0.65	0.73	0.80	0.86	0.91	0.378	<0.01

采用欧式距离公式计算得到苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期灾害样本与聚类样本中心点距离。采用离差标准化方法,对不同发育阶段的欧氏距离进行线性变换,使欧氏距离值映射到[0, 1] 区间,结果如图 3 所示。苹果果树萌动-萌芽期灾害样本对应聚类中心点 0.81、0.87、0.92、0.96 和 0.99 的欧式距离分别为 0.38、0.10、0.46、0.77 和 1.00。以最小欧式距离对应的聚类中心点 0.87, 作为该阶段苹果干旱的触发阈值,即苹果果树萌动-萌芽期干旱发生的触发阈值为 0.87, 认为该阶段干旱指数达到 0.87 时,发生苹果干旱灾害。同理,确定苹果萌芽-盛花期和盛花-成熟期的干旱触发阈值分别为 0.84 和 0.73 (图 3)。总体来说,苹果干旱触发阈值由大到小顺序为苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期。苹果果树萌动-萌芽期与萌芽-盛花期干旱标阈值较为接近,均>0.8。盛花-成熟期时间跨度大,覆盖整个夏季,降雨充沛,相较于果树萌动-萌芽期和萌芽-盛花期,气象干旱条件略有缓解,干旱触发阈值较苹果果树萌动-萌芽期和萌芽-盛花期偏低。

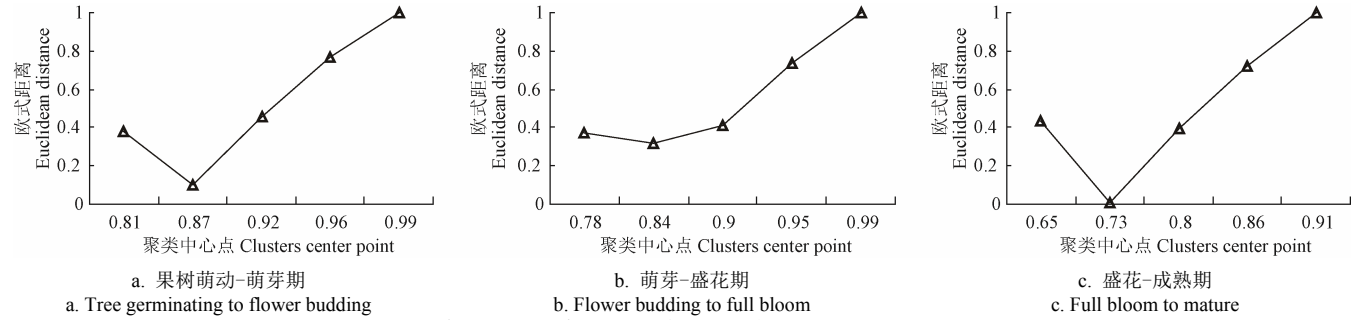


图 3 不同发育期历史灾害样本干旱指数与各聚类样本中心点的欧式距离  
Fig.3 Euclidean distance between historical disaster samples and each cluster center point at different growth stages

2.2 苹果干旱触发阈值检验

2.2.1 干旱指数序列的同一性检验

基于苹果干旱触发阈值判识 1981—2018 年苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期和盛花-成熟期的干旱年份,提取干旱年份的干旱指数序列。提取得到的 1981—2018 年苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期和盛花-成熟期干旱样本数分别 149、142 和 110 个;预留的历史灾害样本数分别为 15、33 和 56 个。对比苹果不同发育阶段干旱指数序列,结果如图 4 所示。基于阈值提取得到的干旱年份干旱指数序列与历史灾害干旱指数序列的频率分布规律基本一致。苹果果树萌动-萌芽期干旱指数主要分布于 0.87~0.92,提取样本与灾害样本占比分别为 72%和 80%。萌芽-盛花期干旱指数分布频率最高的数值区域为[0.84 0.86],提取样本与灾害样本干旱指数在该数值区域占比分别为 33.10%和 33.33%;其次为[0.86 0.88],提取样本与灾害样本干旱指数占比分别为 20.42%和 20.22%。盛花-成熟期干旱指数随着指数增加分布频率逐渐递减,[0.73 0.76]数值区域的干旱指数分布频率最高,提取样本与灾害样本干旱指数在该数值区域占比分别为 31.00%和 32.42%。3 个发育阶段干旱指数平均值和标准差如表 3 所示。苹果果树萌动-萌芽期提取样本与灾害样本干旱指数平均值分别为 0.901 和 0.899;萌芽-盛花期提取样本与灾害样本干旱指数平均值分别为 0.881 和 0.877;盛花-

成熟期取样本与灾害样本干旱指数平均值分别为 0.794 和 0.792。3 个发育阶段的 3 对样本做独立样本  $T$  检验, $T$  检验显著性分别为 0.356、0.264 和 0.871,均大于 0.05,结果表明,3 个发育阶段的样本分别来自同一整体,表明基于阈值提取的苹果干旱年份的干旱指数序列与历史灾害样本干旱指数序列具有同一性。

2.2.2 预留独立样本检验

采用预留的 104 个苹果历史干旱样本,根据记录中的受灾时间和地点,提取苹果干旱指数,根据构建的苹果触发指标阈值,判断苹果是否受灾,进行预留样本的干旱判别准确率检验。由图 5 可以看出,果树萌动-萌芽期的 14 个灾害样本中,11 个样本可通过干旱指数计算判识得到,3 个样本干旱指数值置于阈值线以下,苹果干旱的指标判识结果与实际发生的吻合率为 78.57%;萌芽-盛花期的 33 个样本中,27 个样本干旱指数显示苹果干旱,6 个样本未能通过指标判识得到,该阶段苹果干旱的指标判识结果与实际发生的吻合率为 81.82%;盛花-成熟期的 56 个灾害样本中,5 个样本未通过指标判识得到,51 个样本干旱指数计算结果显示该阶段苹果发生干旱,吻合率为 91.07%。总体来说,104 个独立样本中,89 个判识结果与实际一致,指标判识验证的准确率为 85.58%。

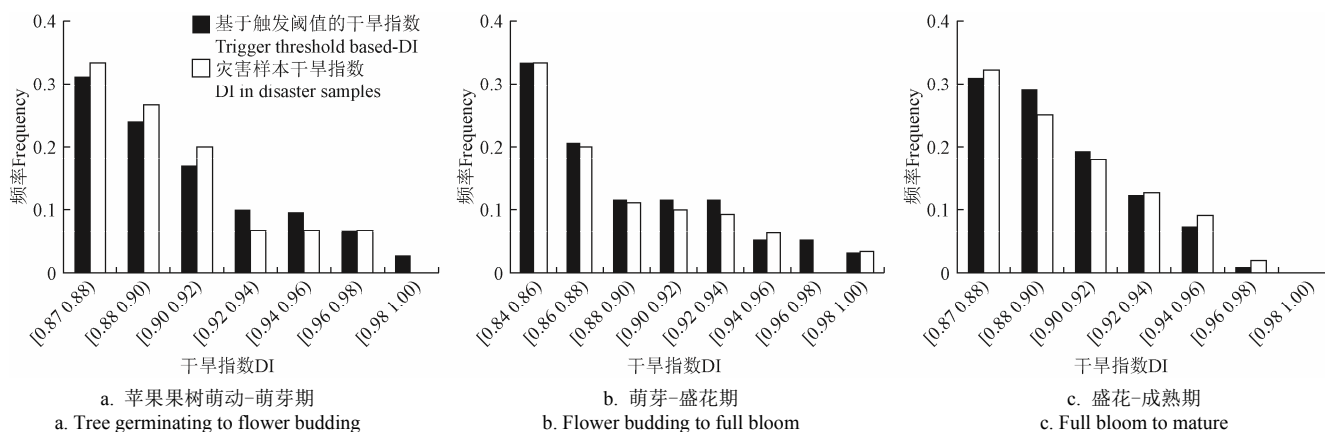


图4 基于触发阈值的干旱指数与历史灾害样本干旱指数频率特征

Fig.4 Frequency characteristics of trigger threshold based-DI and DI in historical disaster samples

表3 基于触发阈值的干旱指数与历史灾害样本干旱指数序列对比分析及  $T$  检验Table 3 Comparison analysis and  $T$  test between trigger threshold based-DI and DI in historical disaster samples

发育阶段 Phenological phase	基于触发阈值的干旱指数序列 Trigger threshold based-DI			历史灾害样本的干旱指数序列 DI in historical disaster samples			$T$ 值 $T$ value
	样本数 Number of samples	平均值 Average	标准差 SD	样本数 Number of samples	平均值 Average	标准差 SD	
萌动-萌芽期 Germinating to flower budding	149	0.901	0.035	15	0.899	0.032	0.356
萌芽-盛花期 Flower budding to full bloom	142	0.881	0.042	33	0.877	0.051	0.264
盛花-成熟期 Full bloom to mature	110	0.794	0.051	56	0.792	0.064	0.871

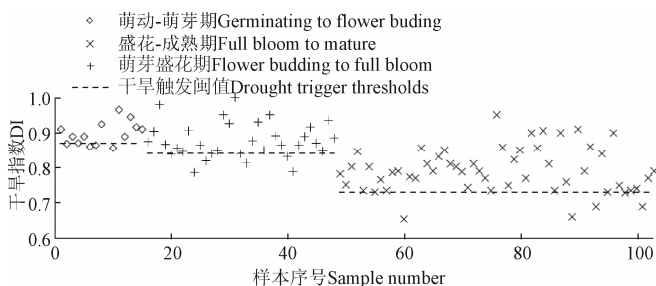


图5 预留灾害样本反演与判识准确性检验

Fig.5 Reserved disaster samples representation and identification accuracy test

### 2.2.3 典型站干旱特征及阈值检验

对比各地区历史灾情记录及预留灾害样本情况, 选择礼泉作为干旱判识指标有效性检验典型站。计算礼泉站 1981—2018 年干旱指数值, 得到礼泉苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期干旱指数时序变化特征, 如图 6 所示。根据灾情样本中记载的礼泉地区苹果干旱发生时间, 提取该站发生苹果干旱的年份和发育阶段, 对照检验干旱触发阈值的判识结果。历史灾情反演得到礼泉地区苹果果树萌动-萌芽期干旱年份, 分别是 1985、1986、1995、1999 和 2001 年。依据 1981—2018 年干旱指数和触发阈值, 4 个年份礼泉苹果果树萌动-萌芽期判识为干旱, 分别为 1985、1986、1995 和 2001

年, 1999 年判识结果为无旱, 与实际结果有差异。果树萌动-萌芽期的指标判识吻合率为 80%。历史灾情反演得到礼泉地区苹果萌芽-盛花期干旱样本 5 个, 分别是 1986、1995、1997、2008 和 2012 年。通过干旱指数计算, 1986、1995、2008 和 2012 年判识结果为干旱, 1997 年判识结果为无旱。萌芽-盛花期的判识吻合率为 80%。历史灾情记录中关于礼泉苹果盛花-成熟期的干旱记载较完善, 灾情反演得到礼泉地区苹果盛花-成熟期干旱样本 11 个, 分别是 1988—1991、1994—1996、2002、2005—2006 和 2016 年。通过干旱指数计算, 11 个年中的 9 个年份判识结果为干旱, 2 个年份判识结果为无旱, 判识吻合率为 81.82%。总体来说, 典型站点长时间序列检验样本共 21 个, 判识结果与实际干旱发生一致的样本 17 个, 判识吻合率为 80.95%。结果表明, 构建的陕西苹果干旱判识指标, 可以用于气候变化背景下长时间序列典型站的苹果干旱判识。

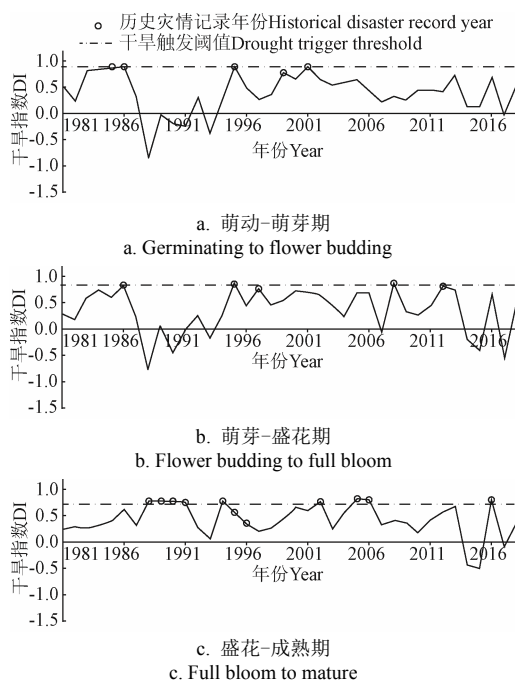


图6 礼泉站苹果不同发育阶段 1981—2018 干旱指数时序变化特征

Fig.6 Temporal characteristics of DI at different apple stages from 1981 to 2018 in Liqueen station

### 3 讨 论

本文参考农田作物干旱指标构建方法, 考虑苹果水分供需特征的同时, 进一步考虑前期水分状况对当前阶段苹果干旱形成的影响。农田作物小麦、玉米等干旱研究中, 通常考虑前 50 d 的水分供需情况来评价当前阶段作物干旱程度<sup>[17,19]</sup>。考虑到林果作物在土壤底墒利用、抗干旱能力等方面均优于农田作物, 采用当前阶段和前 60 d 水分供需状况构建苹果干旱指数。与以往单纯考虑当前阶段水分供需的苹果干旱研究相比, 本文构建的苹果干旱指数更具有理论可行性。

以往的灾害触发判别研究中, 阈值厘定往往采用人工或半人工方法, 主观因素干扰较大。受历史灾情记录数量和质量限制, 灾害样本往往单纯用于指标的验证<sup>[30,49]</sup>。本文深入挖掘 1981—2018 年苹果 3 个发育阶段干旱指数和历史灾害样本干旱指数的特点和联系, 将有限历史灾害样本信息, 投射到 1981—2018 年长序列样本的拟合和分类规律中, 研发适用于林果小样本灾害资料的阈值厘定方法。该研究方法保证了小样本数据 (历史灾害样本干旱指数) 与长序列数据 (1981—2018 年干旱指数序列) 规律表达上的全面型、规范性和一致性, 指标阈值厘定方法客观、科学。苹果干旱触发阈值果树萌动-萌芽期 > 萌芽-盛花期 > 盛花-成熟期, 与程雪等<sup>[20]</sup> 的研究结论基本一致。苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期正处春季少雨时期, 干旱指数普遍偏高; 盛花-成熟期苹果生长干旱环境略有缓解, 苹果干旱触发阈值也略有下降。结合相关文献<sup>[50]</sup> 及灾情记录, 苹果果树萌动-萌芽期若发生干旱 (干旱指数大于 0.87), 则影响苹果树体及花芽萌发, 导致萌芽延迟或萌芽不整齐, 影响新梢生长; 萌芽-盛花期干旱如遇干旱天气 (干旱指数大于 0.84), 则出现严重落花; 盛花-成熟期阶段是苹果关键需水临界期, 花后 40 d 内如果发生干旱 (干旱指数大于 0.73), 则影响果肉细胞分裂。果实膨大期干旱条件直接影响苹果产量和品质。

值得注意的是, 本文随机选取 20% 的灾害样本用于指标阈值厘定, 尽管样本资料可以较为客观地表征历史灾害发生特点, 但难以避免某些样本的代表性较差, 抽样比例差异亦使阈值厘定结果存在偏差。通常情况下, 样本量越大, 抽样误差就越小, 对规律的模拟越准确。但是, 考虑到本文的研究目的, 少量样本被用于指标阈值的厘定, 预留了大量历史灾害样本用于阈值的检验与验证。尽管预留了 80% 的灾害样本用于指标阈值的验证, 但验证样本依然无法实现时序和空间尺度全覆盖, 尤其是苹果开花前灾情数据稀缺, 难以在空间尺度对典型年份苹果干旱分布进行区域性验证。验证样本的区域分布特征、样本年代际分布的丰富程度、典型站点数量及地理特征等因素一定程度上影响苹果不同发育阶段干旱判别的准确率。随着灾情资料的不断完善, 还需逐渐增加指标构建及检验样本, 综合气象、水文、地理、果园管理等多要素, 不断完善和优化干旱阈值和判别方法, 提高苹果干旱判别准确率。

### 4 结 论

本文充分考虑苹果不同发育阶段的水分需求和降水供给情况, 以及前期水分盈亏状况对当前发育阶段苹果生长的影响, 在水分盈亏指数计算的基础上, 构建苹果干旱指数。通过概率分析、K-Means 聚类、欧式距离等方法, 综合分析 1981—2018 年苹果干旱指数与历史灾害样本干旱指数分布与分类特征, 研发基于小样本历史灾害数据和长序列气象、林果生长数据的林果灾害判别方法, 厘定适用于陕西省富士系苹果的干旱触发判别阈值, 主要结论如下:

1) 苹果干旱触发阈值由大到小顺序为苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期。苹果果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期正处春季少雨时期, 干旱指数偏高, 干旱触发阈值分别为 0.87 和 0.84; 盛花-成熟期时间跨度大, 覆盖整个夏季, 降雨充沛, 相较于果树萌动-萌芽期和萌芽-盛花期干旱略有缓解, 但该时期为苹果需水关键期, 干旱触发阈值为 0.73。

2) 基于阈值提取的苹果干旱年份的干旱指数序列与历史灾害样本干旱指数序列具有同一性, 果树萌动-萌芽期、萌芽-盛花期、盛花-成熟期干旱指数分布频率最高的数值区域为 [0.87 0.92)、[0.84 0.86) 和 [0.73 0.76); 预留独立样本指标判别验证的准确率为 85.58%; 典型站点 (礼泉站) 长时间序列检验判别吻合率为 80.95%。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王春乙. 中国重大农业气象灾害研究[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [2] 柏秦凤, 霍治国, 王景红, 等. 中国主要果树气象灾害指标研究进展[J]. 果树学报, 2019, 36(9): 1229-1243. Bai Qinfeng, Huo Zhiguo, Wang Jinghong, et al. Progress in research on meteorological disaster indicators of major fruit trees in China[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(9): 1229-1243. (in Chinese with English abstract)
- [3] 孙悦, 高继卿, 杨晓光. 西北各省季节降水变化及其贡献的差异分析[J]. 中国农业气象, 2019, 40(8): 489-501. Sun Yue, Gao Jiqing, Yang Xiaoguang. Seasonal variation about the occurrence frequency of different types of precipitation and their relative contribution over Northwest China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(8): 489-501. (in Chinese with English abstract)
- [4] 齐月, 陈海燕, 房世波, 等. 1961—2010 年西北地区极端气候事件变化特征[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 963-969. Qi Yue, Chen Haiyan, Fang Shibo, et al. Variation characteristics of extreme climate events in Northwest China during 1961—2010[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 963-969. (in Chinese with English abstract)
- [5] 徐建文, 居辉, 刘勤, 等. 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 460-470. Xu Jianwen, Ju Hui, Liu Qin, et al. Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 460-470. (in Chinese with English abstract)
- [6] 鞠笑生, 邹旭恺, 张强. 气候旱涝指标方法及其分析[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 51-57.

- Ju Xiaosheng, Zou Xukai, Zhang Qiang. The method of the climatic drought-flood index and its analysis[J]. *Journal of Natural Disasters*, 1998, 7(3): 51-57. (in Chinese with English abstract)
- [7] Yang Jianying, Liu Qin, Mei Xurong, et al. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climate factors in Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(12): 2280-2291
- [8] 刘晓静, 马东来, 张继权, 等. 辽西北地区玉米干旱的识别方法[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(3): 722-727.  
Liu Xiaojing, Ma Donglai, Zhang Jiquan, et al. Identification method of maize drought in northwest Liaoning province[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(3): 722-727. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wu Xia, Wang Peijuan, Huo Zhiguo, et al. Crop drought identification index for winter wheat based on evapotranspiration in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 263: 18-30.
- [10] 侯陈瑶, 朱秀芳, 肖名忠, 等. 基于游程理论和 Copula 函数的辽宁省农业气象干旱特征研究[J]. *灾害学*, 2019, 34(2): 222-227.  
Hou Chenyao, Zhu Xiufang, Xiao Mingzhong, et al. Research on agricultural meteorological drought in Liaoning province based on run theory and copula function[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, 34(2): 222-227. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高超, 李学文, 孙艳伟, 等. 淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J]. *作物学报*, 2019, 45(2): 297-309.  
Gao Chao, Li Xuewen, Sun Yanwei, et al. Spatiotemporal characteristics of water requirement and agricultural drought during summer maize season in Huaihe River Basin[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2): 297-309. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李新尧, 杨联安, 聂红梅, 等. 基于植被状态指数的陕西省农业干旱时空动态[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 1172-1180.  
Li Xinyao, Yang Lian'an, Nie Hongmei. Assessment of temporal and spatial dynamics of agricultural drought in Shaanxi Province based on vegetation condition index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(4): 1172-1180. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈少勇, 郭俊瑞, 吴超. 基于降水量距平百分率的中国西南和华南地区的冬旱特征[J]. *自然灾害学报*, 2015, 24(1): 23-31.  
Chen Shaoyong, Guo Junrui, Wu Chao. Characteristics of winter drought in southwest-south China based on precipitation anomaly percentage[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2015, 24(1): 23-31. (in Chinese with English abstract)
- [14] 宋艳玲, 王建林, 田靳峰, 等. 气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 25-34.  
Song Yanling, Wang Jianlin, Tian Jinfeng, et al. The spring maize drought index in Northeast China based on meteorological drought index[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 25-34. (in Chinese with English abstract)
- [15] 安雪丽, 武建军, 周洪奎, 等. 土壤相对湿度在东北地区农业干旱监测中的适用性分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(5): 837-849.  
An Xueli, Wu Jianjun, Zhou Hongkui, et al. Assessing the relative soil moisture for agricultural drought monitoring in Northeast China[J]. *Geographical Research*, 2017, 36(5): 837-849. (in Chinese with English abstract)
- [16] 黄晚华, 隋月, 杨晓光, 等. 基于连续无有效降水日数指标的中国南方作物干旱时空特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4): 125-135.  
Huang Wanhua, Sui Yue, Yang Xiaoguang, et al. Spatio-temporal characteristics of crop drought in southern China based on drought index of continuous days without available precipitation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(4): 125-135. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李崇瑞, 游松财, 武永峰, 等. 改进作物水分亏缺指数用于东北地区春玉米干旱灾变监测[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(21): 175-185.  
Li Chongrui, You Songcai, Wu Yongfeng, et al. Improved crop water deficit index for monitoring drought disaster change process of spring maize in the Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(21): 175-185. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张力, 陈阜, 雷永登. 近 60 年河北省冬小麦干旱风险时空规律[J]. *作物学报*, 2019, 45(9): 1407-1415.  
Zhang Li, Chen Fu, Lei Yongdeng. Spatial and temporal patterns of drought risk for winter wheat grown in Hebei province in past 60 years[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(9): 1407-1415. (in Chinese with English abstract)
- [19] 中华人民共和国国家标准. 农业干旱等级: GB/T 32136—2015[S]. 北京: 中国标准出版社. 2015.
- [20] 程雪, 孙爽, 张方亮, 等. 我国北方地区苹果干旱时空分布特征[J]. *应用气象学报*, 2020, 31(1): 63-73.  
Cheng Xue, Sun Shuang, Zhang Fangliang, et al. Spatial and temporal distributions of apple drought in Northern China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2020, 31(1): 63-73. (in Chinese with English abstract)
- [21] Yang Qiliang, Zhang Fucang, Li Fusheng. Effect of different drip irrigation methods and fertilization on growth, physiology and water use of young apple tree[J]. *Scientia Horticulture*, 2011, 129(1): 119-126.
- [22] 郭爱霞, 石晓昀, 王延秀, 等. 干旱胁迫对 3 种苹果砧木叶片光合、叶绿体超微结构和抗氧化系统的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 178-186.  
Guo Aixia, Shi Xiaoyun, Wang Yanxiu, et al. Effect of drought stress on the photosynthesis, chloroplast ultrastructure and antioxidant system in leaves of three apple rootstocks[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 178-186. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王冰, 丁锡强, 林曲凤, 等. 2016 年烟台苹果与气象条件分析[J]. *山西果树*, 2017(4): 18-19.  
Wang Bing, Ding Xiqiang, Lin Qufeng, et al. Analysis of apple and meteorological conditions of Yantai in 2016[J]. *Shanxi Fruits*, 2017(4): 18-19. (in Chinese with English abstract)



- [24] Yang Q L, Zhang F C, Li F S. Effect of different drip irrigation methods and fertilization on growth, physiology and water use of young apple tree[J]. *Scientia Horticulture*, 2011, 129(1): 119-126.
- [25] 尤彩虹, 景娟, 马远卫. 宝塔区苹果生长主要气象灾害及应对措施[J]. *农业灾害研究*, 2019, 9(3): 84-85.  
You Caihong, Jing Juan, Ma Yuanwei. Main meteorological disasters and counter measures of apple growing in Baota District[J]. *Journal of Agricultural Catastrophe*, 2019, 9(3): 84-85. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王元基. 干旱对苹果品质的影响及其与糖代谢的关系[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.  
Wang Yuanji. Effect of Drought on Apple Quality and Its Relationship with Sugar Metabolism[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [27] 马延庆, 徐志达, 刘长民, 等. 陕西渭北旱塬苹果种植区域农田水分特征分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(2): 54-59.  
Ma Yanqing, Xu Zhida, Liu Changmin, et al. Analysis of characteristics of farmland moisture content in apple producing area of Weibei dry plateau in Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(2): 54-59. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王景红, 柏秦凤, 梁轶, 等. 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, et al. Apple drought index and apple drought risk distribution in Shaanxi at county level[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(3): 516-523. (in Chinese with English abstract)
- [29] Wang Yuanji, Liu Li, Wang Ying, et al. Effects of soil water stress on fruit yield, quality and their relationship with sugar metabolism in 'Gala' apple[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 258: 108753.
- [30] 杨建莹, 霍治国, 吴立, 等. 西南地区水稻洪涝等级评价指标构建及风险分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 135-144.  
Yang Jianying, Huo Zhiguo, Wu Li, et al. Evaluation level construction and analysis of risk on rice flood in Southwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(16): 135-144. (in Chinese with English abstract)
- [31] 汪天颖, 霍治国, 杨建莹, 等. 湖南晚稻洪涝过程等级指标构建与演变特征[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 35-48.  
Wang Tianying, Huo Zhiguo, Yang Jianying, et al. Process grade indicator construction and evolution characteristics of late rice flood in Hunan[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 35-48. (in Chinese with English abstract)
- [32] 杨宏毅, 霍治国, 杨建莹, 等. 江汉和江南西部春玉米涝渍指标及风险评估[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 237-246.  
Yang Hongyi, Huo Zhiguo, Yang Jianying, et al. Indicators and risk of spring corn waterlogging disaster in Jiangnan and west region of Jiangnan[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(2): 237-246. (in Chinese with English abstract)
- [33] 杨建莹, 霍治国, 王培娟, 等. 江西早稻高温热害等级动态判识及时空变化特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 199-207.  
Yang Jianying, Huo Zhiguo, Wang Peijuan, et al. Dynamic identification of double-early rice heat and its spatiotemporal characteristics in Jiangxi Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 199-207. (in Chinese with English abstract)
- [34] 王培娟, 霍治国, 杨建莹, 等. 基于热量指数的东北春玉米冷害指标[J]. *应用气象学报*, 2019, 30(1): 13-24.  
Wang Peijuan, Huo Zhiguo, Yang Jianying, et al. Indicators of chilling damage for spring maize based on heat index in Northeast China[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, 30(1): 13-24. (in Chinese with English abstract)
- [35] 吴霞, 王培娟, 霍治国, 等. 1961—2015 年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J]. *资源科学*, 2017, 39(5): 964-977.  
Wu Xia, Wang Peijuan, Huo Zhiguo, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in China from 1961 to 2015[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 964-977. (in Chinese with English abstract)
- [36] 曾骧, 刘金铜. 苹果与气象[M]. 北京: 气象出版社, 1988.
- [37] 梅旭荣. 中国农业气象资源图集[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2015.
- [38] 龚高法, 简慰民. 我国植物物候期的地理分布[J]. *地理学报*, 1983, 50(1): 33-40.  
Gong Gaofa, Jian Weimin. Geographical distribution of plant phenology in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1983, 50(1): 33-40. (in Chinese with English abstract)
- [39] 温克刚, 翟佑安. 中国气象灾害大典(陕西卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [40] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴[M]. 北京: 气象出版社, 2006-2015.
- [41] Allen R G, Pereira L S, Rase D, et al. Crop Evapotranspiration Guide Lines for Computing Crop Water Requirements[M]. RomeP: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.
- [42] 龚道枝, 康绍忠, 张建华, 等. 苹果树蒸发蒸腾量的测定和计算[J]. *沈阳农业大学学报*, 2004, 35(5): 429-431.  
Gong Daozhi, Kang Shaozhong, Zhang Jianhua, et al. Measuring and estimating evapotranspiration of an apple (*Malus pumila Mill.*) orchard[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2004, 35(5): 429-431. (in Chinese with English abstract)
- [43] 左余宝, 田昌玉, 唐继伟, 等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 70-73.  
Zuo Yubao, Tian Changyu, Tang Jiwei, et al. Studies on ETc and Kc of main crops in Northern Shandong province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(1): 70-73. (in Chinese with English abstract)
- [44] 李娜, 霍治国, 钱锦霞, 等. 基于改进后相对湿度指数的山西省气象干旱时空特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2249-2257.
- [45] Li Na, Huo Zhiguo, Qian Jinxia, et al. Spatiotemporal distribution of drought in Shanxi Province based on modified relative moisture index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(7): 2249-2257. (in Chinese with English abstract)

- weather event-based characteristics of double-early rice heat risk: A study of Jiangxi province, South China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106148.
- [46] 刘大海, 李宁, 晁阳. SPSS 15.0 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [47] 王冰, 伯玥, 姜如茵, 等. 基于聚类分析的胶东半岛苹果种植气候区划[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(7): 134-138. Wang Bing, Bo Yue, Jiang Ruyin, et al. Application of optimized K-means clustering algorithm in China offshore climate regionalization[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(7): 134-138. (in Chinese with English abstract)
- [48] 邱美娟, 刘布春, 刘园, 等. 两种不同产量历史丰歉气象影响指数确定方法在农业气象产量预报中的对比研究[J]. *气象与环境科学*, 2019, 42(1): 41-46. Qiu Meijuan, Liu Buchun, Liu Yuan, et al. Comparative study of two different methods for determining meteorological impact index of historical yield in agrometeorological yield prediction[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, 42(1): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [49] 王春乙, 蔡菁菁, 张继权. 基于自然灾害风险理论的东北地区玉米干旱、冷害风险评价[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 238-245. Wang Chunyi, Cai Jingjing, Zhang Jiquan. Risk assessment of drought and chilling injury of maize in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(6): 238-245. (in Chinese with English abstract)
- [50] 伏健民, 束怀瑞. 春季干旱对金冠苹果不同部位叶片衰老和脱落的影响[J]. *果树学报*, 1993, 10(2): 65-68. Fu Jianmin, Shu Huairui. The effect of spring drought on the senescence and shedding of different parts of the golden crown apple[J]. *Journal of Fruit Science*, 1993, 10(2): 65-68. (in Chinese with English abstract)

## Method for trigger identification of apple drought in northern China

Yang Jianying<sup>1</sup>, Huo Zhiguo<sup>1,2\*</sup>, Xu Jianwen<sup>3</sup>, Wang Peijuan<sup>1</sup>, Wu Dingrong<sup>1</sup>, Mao Hongdan<sup>1</sup>, Kong Rui<sup>1</sup>

(1. *Institute of Ecological and Agricultural Meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;*

2. *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;* 3. *Dalian Meteorological Service Center, Dalian 116001, China*)

**Abstract:** Historical disaster documents can greatly contribute to machine learning from disaster experiences, particularly in understanding the interaction mechanism of regional disaster systems. Historical, agricultural, and meteorological disaster characteristics can be explored by the representation and reanalysis of disaster processes and events, integrating meteorological data and agricultural information. However, compared with field crops, the historical disaster records of cash crops, such as forests and fruits, are relatively scarce, which can make the disaster representation and reanalysis with low accuracy. Therefore, it is of great merit to develop a method for identifying forest and fruit disasters, based on the limited historical disaster data, as well as long series meteorological and fruit growth data, for the cash crop meteorological disasters researches which are lack of historical disaster records. In this study, taking the drought disaster of Fuji Apple in Shaanxi Province as an example, the meteorological data, historical drought disaster, and phenological data were integrated to identify the trigger threshold of apple drought. According to the phenological data of apple collected in this study, tree growth stages, that is, tree germinating to flower budding, flower budding to full bloom, and full bloom to mature, were analyzed as target growth stages for apple. Referring to the drought index construction method for crops, such as wheat and corn, pre- and current water demand and precipitation supply were fully considered in the construction of the apple Drought Index (DI). The probability analysis, K-means clustering, and Euclidean distance were used to comprehensively analyze the distribution and classification characteristics of DI between 35 stations from 1981 to 2018 and historical disaster samples. According to the Euclidean distance between the DI in historical disaster sample and the center point of the cluster sample, the drought trigger threshold of Fuji Apple in tree germinating to flower budding, flower budding to full bloom and full bloom to mature were identified by the corresponding minimum Euclidean distance. Afterwards, the trigger threshold was verified by comparing the sequence of disaster-causing factors and reserving samples. The results showed that: 1) The trigger thresholds of apple drought in tree germinating to flower budding, flower budding to full bloom and full bloom to mature were 0.87, 0.84, and 0.73, respectively. 2) The DI sequences that extracted based on the threshold value in tree germinating to flower budding, flower budding to full bloom and full bloom to mature stages were detected the same characters with that in historical disaster samples. The apple drought data that identified by the calculated of DI and trigger threshold were generally consistent with that disaster records in historical documents, with 85.58% of trigger threshold-based results completely consistent with historical records. The identification coincidence rate was 80.95% in the long-time series validation for typical sites. Generally, the trigger threshold of apple drought can provide a sound technical support for apple drought monitoring, early warning, and assessment in Northern China. The agrometeorological disaster trigger identification method based on small samples of historical disaster data can also offer a paradigm in the current research on the meteorological disasters of cash crops with insufficient historical disaster data.

**Keywords:** drought; meteorology; apple; threshold determination; validity test