

李欣, 王培娟, 唐俊贤, 等. 江南华南茶树高温热害等级指标及分布特征. 应用气象学报, 2024, 35(1): 57-67.  
DOI: 10.11898/1001-7313.20240105

# 江南华南茶树高温热害等级指标及分布特征

李欣<sup>1)</sup> 王培娟<sup>1)\*</sup> 唐俊贤<sup>1)2)</sup> 王旗<sup>1)</sup> 李扬<sup>1)</sup> 霍治国<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081)

<sup>2)</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

利用 1961—2022 年江南和华南茶区 510 个气象站的日最高气温数据和历史茶树高温热害灾情数据, 采用灾情反演和 K-Means 聚类分析方法, 构建并验证江南和华南茶区茶树高温热害等级指标, 分析茶树高温热害时空分布特征。结果表明: 江南和华南茶区茶树轻度、中度、重度高温热害指标为连续 14 d 日最高气温的滑动平均值  $T_{14} \geq 34.5$  °C 的持续日数分别为 1~17 d、18~38 d 和超过 38 d, 验证样本完全符合的准确率为 73.9%, 基本符合的准确率为 91.3%; 江南和华南茶区茶树高温热害总次数呈波动变化, 分别在 1999 年和 1997 年达到最低值, 并在 2021 年达到最高值; 华南茶区相对于江南茶区高温热害次数更多, 尤其是轻度茶树高温热害, 且近 62 年华南茶区茶树高温热害次数增加趋势显著。

**关键词:** 茶树高温热害; 等级指标; 时空分布特征; 江南和华南茶区

## 引言

我国是世界茶树栽种面积最大的国家, 茶树资源丰富<sup>[1-2]</sup>。茶园面积和茶叶产量逐年增加, 2022 年全国茶园面积达  $3.33 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 干毛茶总产量为  $3.18 \times 10^6$  t<sup>[3]</sup>。20 世纪 50 年代以来, 全球大部分地区极端高温事件发生的强度、频率及持续时间均显著增加<sup>[4-5]</sup>, 这对茶叶生产有很大影响。茶树作为亚热带经济作物, 具有喜湿喜温不耐热的生物学特性<sup>[6-7]</sup>, 高温使茶树叶片被灼伤、甚至脱落, 影响茶叶品质与产量<sup>[8]</sup>。因此, 建立茶树高温热害等级指标, 对于精细监测茶树高温热害状况、预防茶树因灾损失至关重要。

高温强度与暴露在高温下的时间影响茶树遭受高温热害的程度<sup>[9]</sup>, 已有关于茶树高温热害等级指标的研究大多以不同高温阈值、不同高温持续时间或两个因子结合的方式定义茶树高温热害等级。陆

健等<sup>[7]</sup>对茶树幼苗及新梢进行不同温度处理, 结果表明 35 °C、40 °C、45 °C 处理下的茶树幼苗和新梢均分别出现轻度、中度和重度的热害变化。陈家金等<sup>[10]</sup>以极端最高气温 35 °C 作为高温阈值, 以不同持续高温日数划分等级作为评价福建茶树高温热害危险性的指标; 杨菲等<sup>[11]</sup>、陶瑶等<sup>[12]</sup>、汪建军等<sup>[13]</sup>、万璐等<sup>[14]</sup>综合考虑高温阈值与持续时间, 将不同日最高气温阈值和不同阈值对应的持续时间作为江南等地区茶树高温热害时空分析与风险区划的指标; 中华人民共和国农业农村部发布的农业行业标准<sup>[15]</sup>建立的茶树高温热害等级指标, 除了使用温度和持续时间还考虑茶树品种和空气相对湿度; 陈思宁等<sup>[16]</sup>认为不同坡向导致温度与风速产生差异, 影响茶树的受害程度, 因此将坡向作为湖北茶树旱热害的评价因子, 结合干燥度与温度分析湖北茶树遭受旱热害的空间分布。

茶树在我国广泛种植, 根据生态条件、生产历史、茶树类型等特点可分为江南茶区、江北茶区、西南茶

2023-09-02 收到, 2023-11-14 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划课题(2019YFD1002203), 国家自然科学基金项目(32171916)

\* 通信作者, 邮箱: wangpj@cma.gov.cn

区、华南茶区<sup>[6]</sup>。目前,茶树高温热害等级指标和时空分布的研究多集中在部分省份<sup>[10,16-18]</sup>、市<sup>[12,19-20]</sup>或江南茶区<sup>[11]</sup>,但缺少对同样易受高温热害的华南茶区的研究。同时,前人研究在不同地区关注的茶树品种不同,周立永等<sup>[21]</sup>关注宜昌当地选育的早茶品种和福云 6 号的高温热害受灾特点;周姣等<sup>[22]</sup>和郭水连等<sup>[23]</sup>分别对毕节市和宜春市种植的安吉白茶进行气候适应性分析;娄伟平等<sup>[24]</sup>将浙江省茶树品种分为 4 个耐热性等级,分析不同耐热性茶树品种的高温热害风险。具体茶树品种的高温热害指标在特定研究区内适用性较好,但是在大范围农业气象灾害监测预警服务时,该高温热害指标的区域适用性则受到极大制约。因此,本研究基于气象数据和历史茶树高温热害灾情数据,使用历史灾情反演方法构建江南和华南茶区茶树高温热害样本,采用 K-Means 聚类分析方法划分茶树高温热害等级,构建适用于江南和华南茶区所有茶树品种的高温热害等级指标,揭示区域尺度茶树高温热害时空分布特征,以期客观理解江南和华南茶区茶树高温热害的发生

区域、重现频率和严重程度,为灾害预警、风险评估及茶产业种植规划布局提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域

江南和华南茶区( $7^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ ,  $104^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ) (图 1)包括浙江、上海、江西、湖南、福建、广西、广东、海南、台湾的全域,以及江苏、安徽和湖北的南部<sup>[25]</sup>。该区域位于亚热带及热带季风气候区内,年降水量为 1400~2000 mm,平均气温为 15~22  $^{\circ}\text{C}$ ,适宜茶树生长<sup>[1,6]</sup>。夏季在西北太平洋副热带高压的控制下,盛行下沉气流,经常出现持续高温天气<sup>[26-27]</sup>,影响茶树的产量与品质。由于暂时缺少台湾省数据,因此本研究仅分析江南和华南茶区除台湾省以外的地区。

本文插图中所涉及的国界和行政区域界线基于审图号为 GS(2017)3320 号标准地图制作,底图无修改。

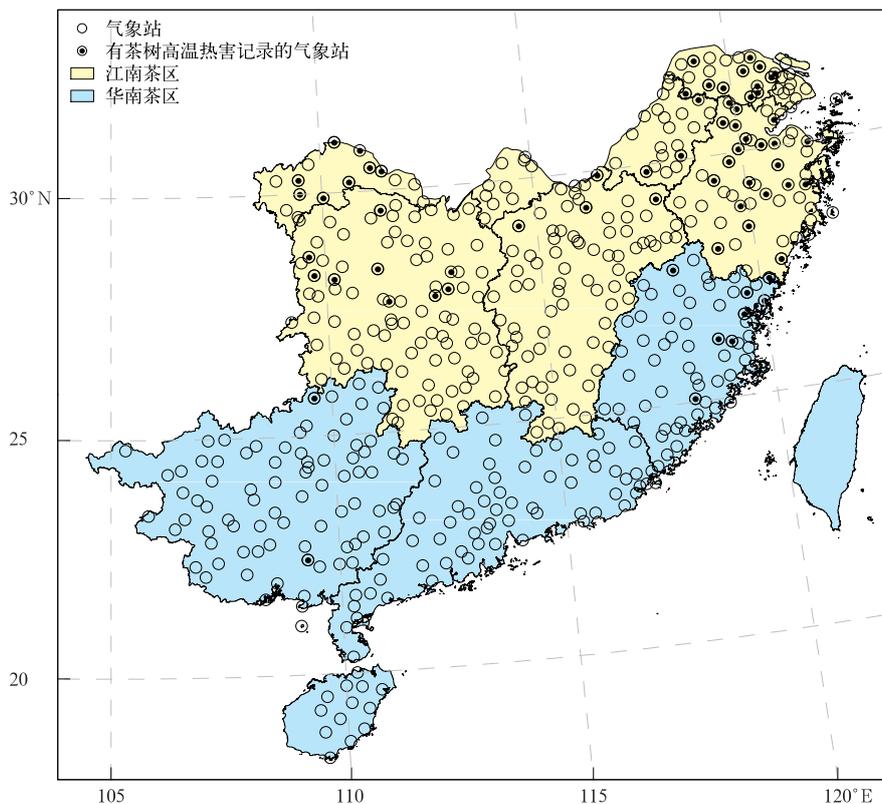


图 1 研究区域和气象站分布

Fig. 1 Target area and distribution of stations

## 1.2 数据

### 1.2.1 气象数据

本文所用气象数据来自国家气象信息中心,经过严格的质量控制与订正,仅保留缺测值不超过5%的气象站,部分缺测值使用相邻两日的平均值替代,得到1961—2022年研究区内510个气象站逐日最高气温数据,用于计算各气象站全年发生的茶树高温热害。

### 1.2.2 灾情数据

灾情记录来自气象灾害管理系统、相关文献记载<sup>[28-30]</sup>、网络新闻报道等。共收集到2011—2022年84条茶树高温热害记录,包括茶树高温热害的时间、地点,其中23条灾情记录还包括茶树受灾情况。本研究将有茶树受灾情况描述的灾情记录用于灾害等级指标验证,其余61条灾情记录用于等级指标构建。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 指标构建

#### 1.3.1.1 茶树高温热害样本构建

灾害持续时间和灾害强度是量化极端天气过程影响程度的重要指标<sup>[31-32]</sup>,以往研究已得到江南和华南茶区茶树高温热害的临界阈值为连续14 d日最高气温的滑动平均值 $T_{14} \geq 34.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ <sup>①</sup>,将日最高气温进行滑动平均处理可以反映持续高温对后续日期高温强度的影响,因此本文以持续日数作为划分

高温热害等级指标的参数,在茶树高温热害临界阈值的基础上,重查茶树高温热害记录中 $T_{14} \geq 34.5 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的持续日数,构建江南和华南茶区茶树高温热害持续日数历史样本集,用于等级指标的构建。

#### 1.3.1.2 聚类分析

K-Means聚类分析<sup>[33]</sup>是根据样本特征的相似性或距离远近将数据划分为若干组的算法。可结合研究需要根据数据集自身特点对其进行分类,已在农作物区划指标、灾害等级指标划分等方面<sup>[34-35]</sup>得到广泛应用。本研究基于江南和华南茶区茶树高温热害持续日数,使用K-Means聚类分析方法,将茶树高温热害等级划分为轻度、中度、重度3级<sup>[36]</sup>。

### 1.3.2 指标验证

#### 1.3.2.1 茶树高温热害验证样本构建

对于有灾情描述的茶树高温热害记录,基于灾情反演方法,计算记录日期当日的茶树高温热害持续日数,并根据茶树高温热害轻度受害、中度受害和重度受害的灾情描述(表1),划分样本等级。如2022年8月23日浙江德清茶园蓬面叶片出现萎蔫和干枯现象,甚至脱落。根据灾情描述,可以确定茶树已经达到重度受害等级,基于茶树高温热害阈值,计算2022年8月23日德清茶树高温热害的持续日数为46 d,由此得到“时间-地点-灾情等级-高温热害持续时间”为“2022-08-23-浙江德清-重度-46 d”的1条茶树高温热害验证样本。

表1 茶树高温热害灾情描述分级<sup>[36]</sup>

Table 1 Description and classification of high temperature heat damage of tea plants(from Reference [36])

等级	灾情描述
轻度	部分受灾、受损,受害茶树仅部分叶片出现变色、枯焦,茶枝上部芽叶仍呈现绿色
中度	成灾、部分绝收,受害茶树多数叶片变色、枯焦或脱落,但茶枝顶端叶片或茶芽虽变色但尚未完全枯死
重度	大量减产、绝收,受害茶树叶片变色、枯焦脱落,且蓬面枝条已出现干枯甚至整株死亡

#### 1.3.2.2 验证方法

根据验证样本的高温热害持续日数,利用构建的茶树高温热害等级指标判断茶树高温热害等级,验证其与灾情描述等级是否一致。灾情描述等级与指标计算等级相同的记为完全符合,相差不超过1级记为基本符合,相差2级或有受害症状但指标判断为无灾均记为与实际灾情不符<sup>[37]</sup>。

### 1.3.3 茶树高温热害时空特征分析

#### 1.3.3.1 高温热害次数

茶树高温热害次数反映江南和华南茶区茶树高温热害的发生频率,次数越大、茶树高温热害发生越

频繁。统计1961—2022年平均各气象站发生轻度、中度、重度不同等级高温热害次数,表征江南和华南茶区茶树高温热害发生频率的时间变化;统计各气象站平均每10年发生轻度、中度、重度等级的茶树高温热害次数以及高温热害总次数,表示江南和华南茶区茶树高温热害频率的空间特征。

#### 1.3.3.2 趋势分析

对1961—2022年江南和华南茶区各气象站茶树高温热害次数序列采用一元线性趋势分析方法,拟合年份和高温热害次数的线性关系,拟合方程的斜率大于0表示茶树高温热害次数呈增加趋势,反

①李欣,王培娟,唐俊贤,等.江南和华南茶区茶树高温热害识别及阈值验证.生态学杂志,待发表.

之为减小趋势。使用  $F$  检验判断拟合方程的显著性,显著性概率小于 0.05 记为显著,大于或等于 0.05 记为不显著。根据拟合方程系数和显著性,可将各气象站茶树高温热害次数的趋势分为显著增加、不显著增加、不显著减少和显著减少。

## 2 结果分析

### 2.1 茶树高温热害等级指标

#### 2.1.1 等级指标构建

基于江南和华南茶区茶树高温热害临界阈值,重新判识茶树高温热害灾情记录,得到 2011—2022 年共 61 条江南和华南茶区茶树高温热害持续时间记录。利用 K-Means 聚类分析工具,将江南和华南

茶区的茶树高温热害持续时间样本分为轻度、中度和重度等级,得到江南和华南茶区茶树高温热害等级指标为  $T_{14} \geq 34.5$  °C 持续 1~17 d 为轻度高温热害,持续 18~38 d 为中度高温热害,超过 38 d 则达到重度高温热害。

#### 2.1.2 等级指标的验证

基于有灾情描述的茶树高温热害记录构建茶树高温热害验证样本,验证等级指标的准确性(表 2)。在 23 个验证样本中,17 个样本描述等级与指标划分的等级完全符合,准确率为 73.9%;4 个样本的描述等级与指标划分等级相差 1 级,基本符合的准确率为 91.3%。表明基于茶树高温热害持续日数并利用 K-Means 聚类分析方法划分茶树高温热害等级指标对于实际灾情的判识准确性较好。

表 2 茶树高温热害等级指标验证样本的数量及验证结果

Table 2 Number of validation samples and verification results of grade index of high temperature heat damage of tea plants

灾情等级	验证结果			样本量
	完全符合	基本符合	与实际灾情不符	
轻度	5	0	0	5
中度	3	1	1	5
重度	9	3	1	13
样本量	17	4	2	23

指标判识结果与实际灾情不符的两条记录分别位于福建霞浦和浙江平阳,绘制两地灾情记录之前连续 14 d 日最高气温滑动平均值变化图(图 2)。根据灾情记录,2022 年 8 月 4 日福建霞浦茶园达到中度高温热害,但指标判识显示当地仅在 7 月 21—29 日发生了持续 9 d 高温热害,达到轻度热害等级,8 月 4 日当天并未发生茶树高温热害(图 2),可能是

由于实际上轻度高温热害未缓解,导致指标判识与灾情记录不符。同样,浙江平阳在 2022 年 8 月 23 日记录发生了重度高温热害,而指标判识显示 8 月 23 日前仅连续 2 d 达到高温热害阈值,与实际灾情记录不符。但 7 月 18 日—8 月 3 日平阳遭遇持续 17 d 的高温热害过程,这可能是导致灾情记录比指标判识灾情严重的原因。

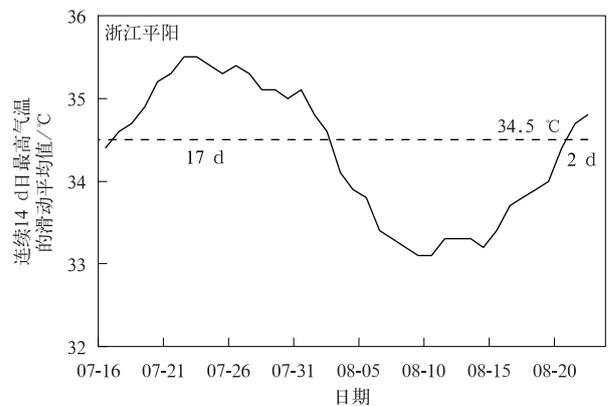
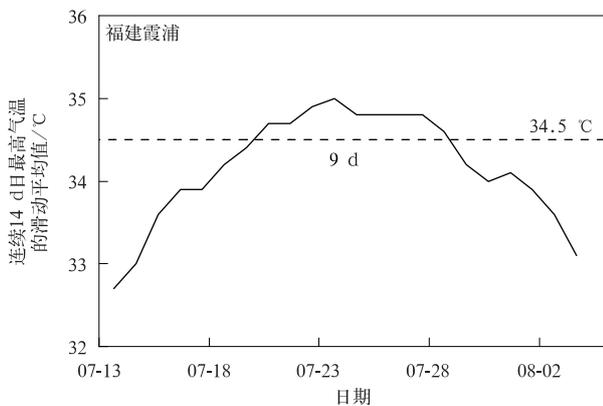


图 2 2022 年福建霞浦和浙江平阳连续 14 d 日最高气温滑动平均值

Fig. 2 Moving average of 14-day maximum temperature at Xiapu of Fujian and Pingyang of Zhejiang in 2022

## 2.2 江南和华南茶区茶树高温热害次数时空特征

### 2.2.1 高温热害次数时间变化特征

图 3 为 1961—2022 年江南和华南茶区各气象站发生不同等级茶树高温热害次数的时间序列。由图 3 可知,江南茶区轻度茶树高温热害每年均有发生,年平均次数为 0.90 次,有 3 年未发生中度茶树高温热害,年平均次数为 0.28 次,15 年未发生重度高温热害,年平均次数为 0.10 次。总次数最低值出现在 1999 年,为 0.29 次,最高值出现在 2021 年,为

2.31 次。华南茶区轻度茶树高温热害每年均有发生,年平均次数为 0.92 次,仅有 1 年未发生中度茶树高温热害,年平均次数为 0.18 次,20 年未发生重度高温热害,年平均次数为 0.04 次。总次数最低值出现在 1997 年,为 0.09 次,最高值出现在 2021 年,为 2.67 次。华南茶区平均轻度高温热害次数均值与江南茶区接近,中度和重度热害次数均值均低于江南茶区。

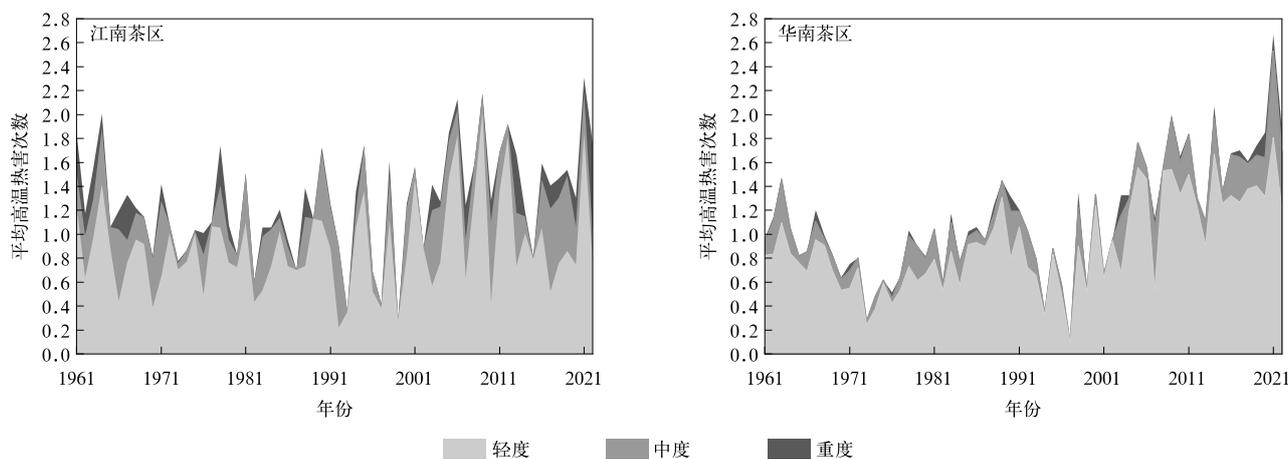


图 3 1961—2022 年江南和华南茶区茶树高温热害次数

Fig. 3 High temperature heat damage frequency in tea region of Southern Yangtze River and South China from 1961 to 2022

### 2.2.2 高温热害次数空间变化特征

图 4 为江南和华南茶区的高温热害次数分布。

由图 4 可知,江南茶区轻度高温热害次数为 0.2~16.0 次·(10 a)<sup>-1</sup>,呈现中间高、两边低的特征,高

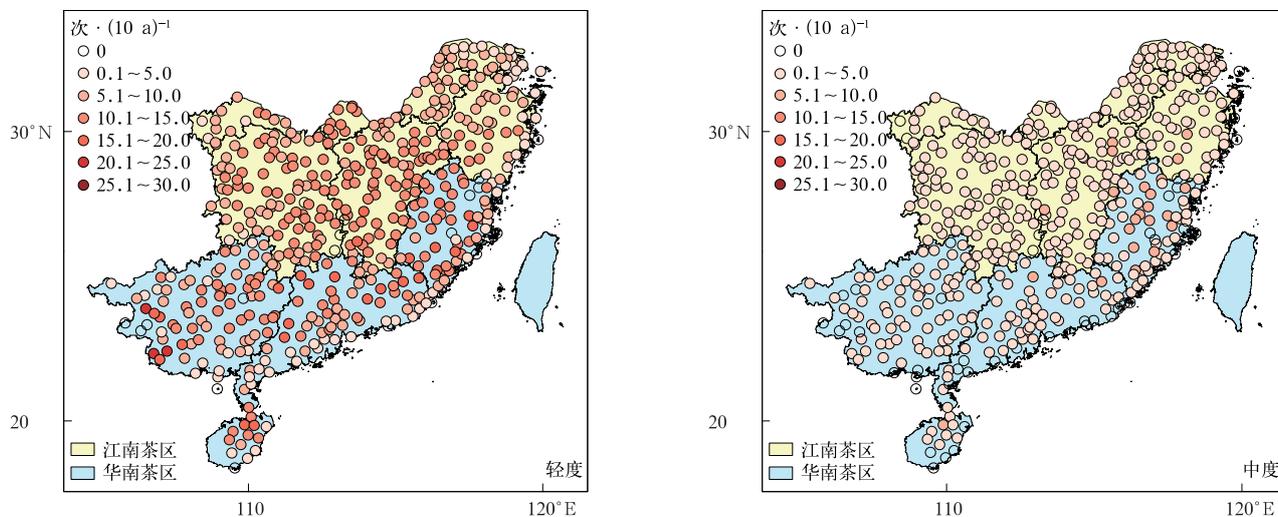
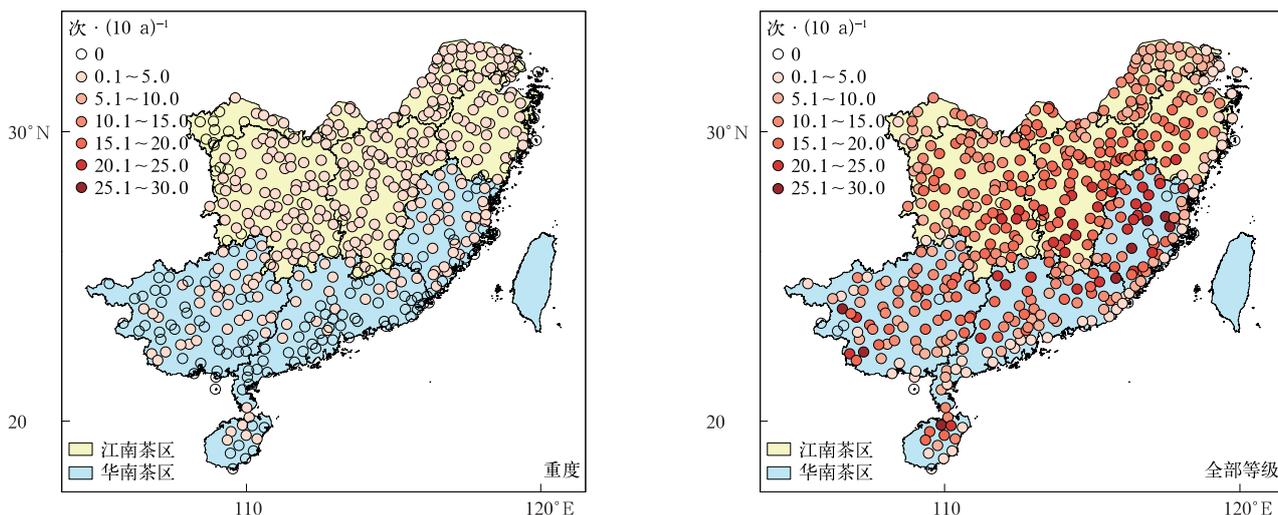


图 4 江南和华南茶区不同等级茶树高温热害次数分布特征

Fig. 4 Frequency distribution of different grades of high temperature heat damage in tea region of Southern Yangtze River and South China



续图 4

值主要位于江西和湖南的大部分地区, 低值主要位于湖北西南部, 江苏南部和沿海地区, 8 个气象站未发生过高温热害, 站次比为 2.9%。华南茶区轻度高温热害次数呈现内陆高、沿海低的特征, 最高值出现在广西崇左, 为  $23.7 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 最低值出现在广东惠来, 为  $0.2 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 15 个气象站未发生过轻度高温热害, 站次比为 6.8%。江南茶区中度高温热害次数除江西和浙江部分气象站外绝大多数不超过  $5 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 有 12 个气象站未发生中度高温热害, 站次比为 4.4%。华南茶区未发生中度高温热害的气象站多分布在沿海地区, 共 43 个站, 站次比为 19.5%, 发生中度高温热害的除福建、广东和海南的部分气象站外均未超过  $5 \text{ 次} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。江南茶区有 42 个气象站未发生重度高温热害, 站次比为 15.3%, 主要分布在湖北西南部和浙江沿海; 华南茶区有 113 个气象站未发生重度高温热害, 站次比达到 51.4%。从高温热害总次数看, 江南茶区呈南高北低特征, 江西为高温热害最频发的地区; 华南茶区为北高南低, 福建高温热害发生次数最多。

### 2.2.3 高温热害次数变化趋势

图 5 为江南和华南茶区的高温热害次数变化趋势。由图 5 可知, 江南茶区大部分气象站轻度高温热害次数变化趋势均呈现不显著的增加或减少的特征, 江苏和浙江的沿海地区、江西、湖南和湖北部分气象站呈显著增加的趋势, 仅湖南南部的嘉禾站呈现显著减少的趋势, 这与张曦等<sup>[38]</sup>对湖南夏季高温

热浪频次的变化趋势研究一致, 仅有极少数的气象站通过显著性检验。华南茶区 41.4% 的气象站均出现轻度高温热害次数显著增加的趋势, 且主要分布在沿海地区。对于中度高温热害次数变化趋势, 江南茶区呈中部减少、四周增加分布特征, 但大部分气象站的变化趋势不显著, 仅江苏南部、浙江东部、江西和湖南南部以及湖北与湖南交界地带的部分气象站中度高温热害次数显著增加, 湖南中部部分气象站显著减少; 华南茶区中度高温热害次数显著增加的气象站主要分布在福建沿海地区、广东中部、广西中部和海南北部, 福建三明站中度高温热害次数显著减少。从重度高温热害次数变化趋势看, 江南茶区依旧为中部减少、四周增加, 出现显著减少趋势的气象站集中在江西中部, 出现显著增加趋势的气象站分布在江苏、浙江、湖南和江西南部; 华南茶区呈显著增加趋势的气象站主要分布在福建沿海、广东、广西和海南的北部、广西的南部。从高温热害总次数变化趋势看, 江南茶区出现显著增加趋势的气象站主要分布在四周, 未出现显著减少趋势的气象站; 华南茶区出现显著增加趋势的气象站覆盖大部分地区, 出现显著减少趋势的气象站散布于云南西北部, 这与张嘉仪等<sup>[39]</sup>使用不同方法分析全国范围内高温热浪次数变化趋势的结果较为一致, 华南茶区高温热浪大部分气象站或格点呈现显著增加趋势, 而江南茶区只有部分气象站或格点高温热浪次数显著增加。

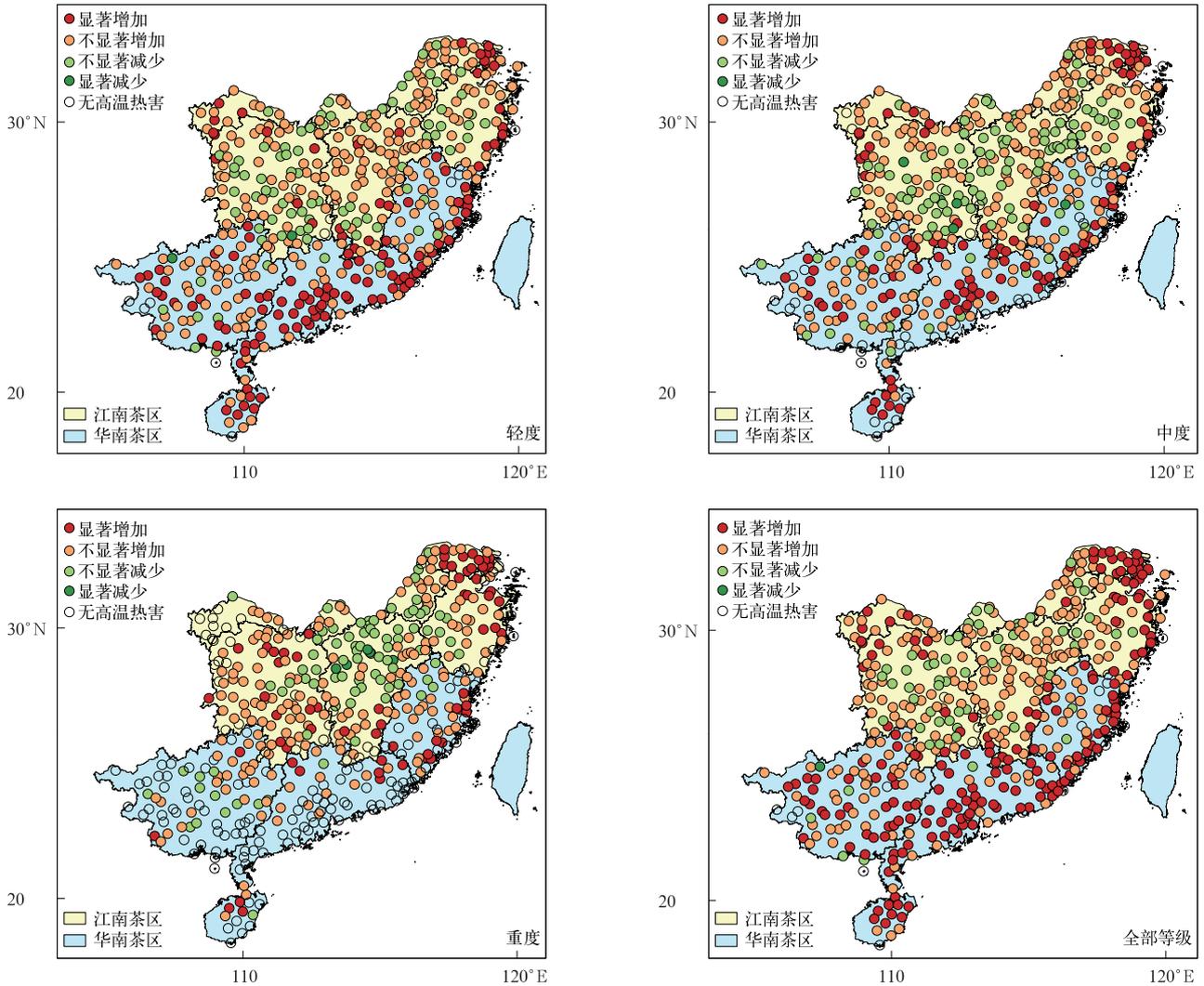


图 5 江南和华南茶区不同等级茶树高温热害次数变化趋势  
 Fig. 5 Frequency trend of different grades of high temperature heat damage in tea region of Southern Yangtze River and South China

### 3 结论与讨论

本文基于 1961—2022 年江南和华南茶区的气象数据和历史灾情数据,使用灾情反演与 K-Means 聚类分析方法构建并验证江南和华南茶区茶树高温热害等级指标,进而分析茶树高温热害特征,主要结论如下:

1) 利用 K-Means 聚类分析法得到江南和华南茶区茶树轻度、中度、重度高温热害指标为  $T_{14} \geq 34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的持续日数分别为 1~17 d、18~38 d 和超过 38 d,验证样本完全符合的准确率为 73.9%,基本符合的准确率为 91.3%。

2) 江南和华南茶区茶树高温热害总次数在

1961—2022 年呈波动特征,分别在 1999 年和 1997 年达到最低值,两个茶区都在 2021 年达到最高值。

3) 在空间分布上,华南茶区相对于江南茶区高温热害次数更多,尤其是轻度茶树高温热害,且华南茶区茶树高温热害次数的增加趋势显著。

本文基于江南和华南茶区的茶树高温热害灾情样本,使用  $T_{14} \geq 34.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  的持续日数作为等级指标划分的依据,并利用受灾情况描述的样本进行验证。与前人建立的茶树高温热害等级指标<sup>[11-15]</sup>相比,来自自然环境的灾情样本更客观地反映了高温热害对茶树的影响。本文使用的日最高气温的滑动平均值较前人将高温强度与持续日数分开考虑的指标<sup>[11-15]</sup>,更能反映高温的累积效应<sup>[14]</sup>,但可能会推迟对茶树高温热害结束时间的判识。虽然灾情记录

分布不均可能对结果有一定影响,但从现有数据的验证结果看,该方法准确性较高,可用于监测和评估江南和华南茶区茶树高温热害。

本文分析江南和华南茶区茶树高温热害次数的时空分布特征,2000年后两个茶区的茶树高温热害次数偏高,这可能与进入21世纪后全球变暖有关<sup>[40-41]</sup>。在空间分布上,华南茶区高温热害发生次数比江南茶区更多,可能是由于两个茶区处于不同的高温类型,江南茶区所在的江淮型高温地区,高温强度最强,华南茶区所在的华南型高温是西北太平洋副热带高压直接控制下的高温,与季风环流密切相关,持续高温过程跨越季节最长,且高温过程平均次数也最多<sup>[42-43]</sup>。本文对于茶树高温热害次数的变化趋势分析发现沿海地区的茶树高温热害次数出现显著增加趋势,这与贾佳等<sup>[44]</sup>对中国高温热浪频次变化趋势的研究结果一致,而沿海地区多为平原,内陆更多为山地地形,该特点对茶树高温热害次数趋势变化的影响还有待进一步研究。

茶树生长除了受到温度条件的影响,同时也受到水分条件制约<sup>[6]</sup>。江南和华南茶区随着夏季雨带北移,不仅容易出现高温天气,还会存在干旱的风险<sup>[45]</sup>,使茶树出现早热害症状<sup>[46-47]</sup>。本文建立的茶树高温热害指标仅考虑温度条件,并未考虑可能发生干旱的风险,影响指标对于茶树高温热害判识的准确性。因此,构建基于多因素的茶树早热害指标将成为未来研究工作的重点。

### 参考文献

- [1] 李焯,贺龄萱. 茶与气象. 北京:气象出版社,2005.  
Li Z, He L X. Tea and Meteorology. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [2] 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.
- [3] 梅宇,梁晓. 2021年中国茶叶生产与内销形势分析. 中国茶叶, 2022, 44(4): 17-22.  
Mei Y, Liang X. Analysis of China's tea production and domestic sales in 2021. *China Tea*, 2022, 44(4): 17-22.
- [4] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021: 3-32.
- [5] 齐道日娜,何立富. 2022年我国夏季极端高温阶段性特征及成因. 应用气象学报, 2023, 34(4): 385-399.  
Chyi D, He L F. Stage characteristics and mechanisms of extreme high temperature in China in summer of 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 385-399.
- [6] 金志凤,姚益平. 江南茶叶生产气象保障关键技术研究. 北京:气象出版社,2017.  
Jin Z F, Yao Y P. Research on Key Technique of Meteorological Support for the Tea Production in Regions South of the Yangtze River. Beijing: China Meteorological Press, 2017.
- [7] 陆健,刘国华. 茶叶热害机理探讨. 广东茶业, 1992(3): 33-36.  
Lu J, Liu G H. Discussion on the mechanism of tea heat damage. *Guangdong Tea Industry*, 1992(3): 33-36.
- [8] 霍治国,张海燕,李春晖,等. 中国玉米高温热害研究进展. 应用气象学报, 2023, 34(1): 1-14.  
Huo Z G, Zhang H Y, Li C H, et al. Review on high temperature heat damage of maize in China. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 1-14.
- [9] 韩冬,杨菲,杨再强,等. 高温对茶树叶片光合及抗逆特性的影响和恢复. 中国农业气象, 2016, 37(3): 297-306.  
Han D, Yang F, Yang Z Q, et al. Effects of high temperature stress and recovery on photosynthesis and stress tolerance of tea leaves. *Chinese J Agrometeor*, 2016, 37(3): 297-306.
- [10] 陈家金,黄川容,孙朝锋,等. 福建省茶叶气象灾害致灾危险性区划与评估. 自然灾害学报, 2018, 27(1): 198-207.  
Chen J J, Huang C R, Sun C F, et al. Disaster-causing hazard division and evaluation of meteorological disasters for tea in Fujian Province. *J Nat Disasters*, 2018, 27(1): 198-207.
- [11] 杨菲,王学林,杨再强,等. 江南地区茶树高温热害时空分布特征及风险区划. 自然灾害学报, 2015, 24(3): 216-224.  
Yang F, Wang X L, Yang Z Q, et al. Spatiotemporal pattern and risk zoning of tea heat injury in south region of the Yangtze River. *J Nat Disasters*, 2015, 24(3): 216-224.
- [12] 陶瑶,陈娇娇,余焰文,等. 气候变化背景下婺源绿茶农业气象灾害的演变特征. 江西农业学报, 2022, 34(4): 186-191.  
Tao Y, Chen J J, Yu Y W, et al. Evolution characteristics of agro-meteorological disasters of Wuyuan green tea under background of climate change. *Acta Agric Jiangxi*, 2022, 34(4): 186-191.
- [13] 汪建军,杨爱萍,张坤,等. 气候变化对江西茶树高温热害的影响. 江西农业学报, 2020, 32(11): 94-98.  
Wang J J, Yang A P, Zhang K, et al. Effects of climate change on tea heat injury in Jiangxi Province. *Acta Agric Jiangxi*, 2020, 32(11): 94-98.
- [14] 万璐,陈惠,陈惠玲,等. 福建省茶树高温热害致灾危险性区域划分. 中国农业气象, 2023, 44(3): 219-227.  
Wan L, Chen H, Chen H L, et al. Distribution of disaster risk about high temperature on tea plants in Fujian Province. *Chinese J Agrometeor*, 2023, 44(3): 219-227.
- [15] 中华人民共和国农业农村部. 茶树高温热害等级(NY/T 3419—2019). 北京:中国农业出版社,2019.  
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Grade of Heat Injury for Tea Plant [*Camellia*

- sinensis* (L.) O. Kuntze] (NY/T 3419—2019). Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [16] 陈思宁, 申双和, 刘敏, 等. 湖北省茶树气象灾害模糊综合评价及区划. 农业工程学报, 2010, 26(12): 298-303.  
Chen S N, Shen S H, Liu M, et al. Fuzzy synthetical evaluation of meteorological disasters to *Camellia Sinensis* (L. O. Ktze) and its regionalization in Hubei Province. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2010, 26(12): 298-303.
- [17] 金志凤, 胡波, 严甲真, 等. 浙江省茶叶农业气象灾害风险评价. 生态学杂志, 2014, 33(3): 771-777.  
Jin Z F, Hu B, Yan J Z, et al. Agro-meteorological disaster risk evaluation of tea planting in Zhejiang Province. *Chinese J Ecol*, 2014, 33(3): 771-777.
- [18] 李柏贞, 孔萍. 江西省茶叶气象灾害风险评价. 能源研究与管理, 2020(1): 63-68.  
Li B Z, Kong P. Meteorological disaster risk evaluation of tea in Jiangxi Province. *Energy Res Manag*, 2020(1): 63-68.
- [19] 姜燕敏, 李松平, 马军辉, 等. 浙南茶树高温热害日数的气候变化特征. 中国农学通报, 2019, 35(19): 102-106.  
Jiang Y M, Li S P, Ma J H, et al. Heat injury days of tea in southern Zhejiang: Climate change characteristics. *Chinese Agric Sci Bull*, 2019, 35(19): 102-106.
- [20] 季丹丹, 胡燕华, 包君俏, 等. 柯桥区茶叶气候风险区划. 农学报, 2020, 10(4): 83-88.  
Ji D D, Hu Y H, Bao J Q, et al. Climate risk zoning of tea in Keqiao district. *J Agric*, 2020, 10(4): 83-88.
- [21] 周立永, 张光国, 廖胜才, 等. 茶树高温干旱防御及灾后恢复措施——以2022年梯归县茶树高温干旱受灾调研为例. 中国茶叶, 2023, 45(3): 53-56.  
Zhou L Y, Zhang G G, Liao S C, et al. Prevention and post-disaster recovery measures for high temperature and drought of tea plants—A case study of high temperature and drought disaster in tea gardens of Zigui County in 2022. *China Tea*, 2023, 45(3): 53-56.
- [22] 周姣, 聂祥, 李刚, 等. 毕节市七星关区引种安吉白茶的气候适应性分析. 南方农业, 2023, 17(7): 104-108.  
Zhou J, Nie X, Li G, et al. Climate adaptability analysis of introducing Anji white tea in Qixingguan District, Bijie City. *South China Agriculture*, 2023, 17(7): 104-108.
- [23] 郭水连, 吴春燕, 郭卫平. 江西宜春引种安吉白茶的气候适应性分析. 茶叶科学技术, 2010, 51(3): 34-37.  
Guo S L, Wu C Y, Guo W P. Analysis on climate adaptability of Anji white tea introduced from Yichun, Jiangxi Province. *Tea Sci Technol*, 2010, 51(3): 34-37.
- [24] 娄伟平, 肖强, 孙科, 等. 浙江省茶树高温热害风险区划. 茶叶科学, 2018, 38(5): 480-486.  
Lou W P, Xiao Q, Sun K, et al. Heat stress risk regionalization of tea plant in Zhejiang Province. *J Tea Sci*, 2018, 38(5): 480-486.
- [25] 唐俊贤, 王培娟, 俄有浩, 等. 中国大陆茶树种植气候适宜性区划. 应用气象学报, 2021, 32(4): 397-407.  
Tang J X, Wang P J, E Y H, et al. Climatic suitability zoning of tea planting in China's mainland. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 397-407.
- [26] 方宇凌, 简茂球. 2003年夏季华南持续高温天气过程及热力诊断. 热带海洋学报, 2011, 30(3): 30-37.  
Fang Y L, Jian M Q. Diagnosis study of persistent heat waves in South China during summer 2003. *J Trop Oceanogr*, 2011, 30(3): 30-37.
- [27] 彭京备, 孙淑清, 林大伟. 2022年8月长江流域持续性极端高温事件成因. 应用气象学报, 2023, 34(5): 527-539.  
Peng J B, Sun S Q, Lin D W. The extreme hot event along the Yangtze Basins in August 2022. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(5): 527-539.
- [28] 罗列万. 2013年浙江省夏季茶园高温干旱受灾情况调查评估. 中国茶叶, 2013, 35(9): 17.  
Luo L W. Investigation and evaluation of summer tea garden disaster caused by high temperature and drought in Zhejiang Province in 2013. *China Tea*, 2013, 35(9): 17.
- [29] 刘海清. 2013年湘潭市茶园旱热害情况及预防对策. 茶叶通讯, 2013, 40(4): 50.  
Liu H Q. Drought and heat damage of tea gardens in Xiangtan city in 2013 and its preventive countermeasures. *Tea Commun*, 2013, 40(4): 50.
- [30] 李素芹, 刘启梅, 曹绪勇, 等. 宜都市茶叶高温热害现象调查与思考. 基层农技推广, 2017, 5(11): 97-98.  
Li S Q, Liu Q M, Cao X Y, et al. Investigation and thinking on the phenomenon of high temperature heat damage of tea in Yidu city. *Prim Agric Technol Ext*, 2017, 5(11): 97-98.
- [31] 李翔翔, 黄淑娥, 谢远玉, 等. 果实膨大期高温对赣南脐橙品质影响的评估指数构建. 生态学杂志, 2022, 41(12): 2489-2496.  
Li X X, Huang S E, Xie Y Y, et al. Construction of evaluation index for the effects of high temperature during fruit expansion period on the quality of Newhall navel orange in southern Jiangxi Province. *Chin J Ecol*, 2022, 41(12): 2489-2496.
- [32] 唐余学, 郭建平. 我国东北地区玉米冷寒风险评估. 应用气象学报, 2016, 27(3): 352-360.  
Tang Y X, Guo J P. Risk assessment of maize chilling injury in Northeast China. *J Appl Meteor Sci*, 2016, 27(3): 352-360.
- [33] 周明珠, 徐晶. 西北太平洋热带气旋强度和尺度协同变化特征. 应用气象学报, 2023, 34(4): 463-474.  
Zhou M Z, Xu J. Covariation relationship between tropical cyclone intensity and size change over the Northwest Pacific. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(4): 463-474.
- [34] 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.  
Bai Q F, Wang J H, Li H L, et al. Freezing injury indicator of tasty kiwifruit during overwintering period. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(4): 504-512.
- [35] 杨凯, 陈彬彬, 陈惠, 等. 福建省台湾青枣寒害综合气候指标与等级划分. 应用气象学报, 2020, 31(4): 427-434.

- 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.
- [36] 肖强, 韩文炎. 茶树热旱害症状及分级方法. *中国茶叶*, 2013, 35(9): 21.
- Xiao Q, Han W Y. Symptoms and grading methods of heat and drought damage in tea trees. *China Tea*, 2013, 35(9): 21.
- [37] 毛红丹, 霍治国, 张蕾, 等. 环渤海葡萄涝渍指标构建及风险评估. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 92-103.
- Mao H D, Huo Z G, Zhang L, et al. Indicator construction and risk assessment of grape waterlogging in the Bohai Rim. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(1): 92-103.
- [38] 张曦, 黎鑫. 湖南省夏季高温热浪时空分布特征及其成因. *气候与环境研究*, 2017, 22(6): 747-756.
- Zhang X, Li X. Spatial-temporal characteristics and causes of summer heat waves in Hunan Province. *Climate Environ Res*, 2017, 22(6): 747-756.
- [39] 张嘉仪, 钱诚. 1960—2018年中国高温热浪的线性趋势分析方法与变化趋势. *气候与环境研究*, 2020, 25(3): 225-239.
- Zhang J Y, Qian C. Linear trends in occurrence of high temperature and heat waves in China for the 1960—2018 period: Method and analysis results. *Climate Environ Res*, 2020, 25(3): 225-239.
- [40] 陈颖, 张灵, 千怀遂. 华南地区近53a极端高温日数的变化特征及其区域差异. *热带地理*, 2016, 36(4): 692-699.
- Chen Y, Zhang L, Qian H S. Variation characteristics and spatial differences of extremely high temperature days over South China during the recent 53 years. *Trop Geogr*, 2016, 36(4): 692-699.
- [41] 杨涵涓, 马悦, 史军. 全球变暖背景下长江三角洲夏季高温时空演变研究. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(7): 1544-1553.
- Yang H W, Ma Y, Shi J. Spatial and temporal characteristics of summertime high temperature in Yangtze River Delta under the background of global warming. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2018, 27(7): 1544-1553.
- [42] 贾子康, 郑志海, 封国林. 中国南方地区盛夏高温类型及其对应的大尺度环流和海温异常. *气象学报*, 2020, 78(6): 928-944.
- Jia Z K, Zheng Z H, Feng G L. Midsummer high temperature types in southern China and corresponding large-scale circulation and sea surface temperature anomalies. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(6): 928-944.
- [43] 林爱兰, 谷德军, 彭冬冬, 等. 近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征. *应用气象学报*, 2021, 32(3): 302-314.
- Lin A L, Gu D J, Peng D D, et al. Climatic characteristics of regional persistent heat event in the eastern China during recent 60 years. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 302-314.
- [44] 贾佳, 胡泽勇. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势. *地球科学进展*, 2017, 32(5): 546-559.
- Jia J, Hu Z Y. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China. *Adv Earth Sci*, 2017, 32(5): 546-559.
- [45] Shi Z T, Jia G S, Zhou Y Y, et al. Amplified intensity and duration of heatwaves by concurrent droughts in China. *Atmos Res*, 2021, 261: 105743.
- [46] 黎健龙, 李家贤, 唐劲驰, 等. 热旱对茶树产量的影响及防灾措施浅析. *茶叶科学技术*, 2007, 48(4): 9-10.
- Li J L, Li J X, Tang J C, et al. Influence of heat and drought on tea yield and analysis of disaster prevention measures. *Tea Sci Technol*, 2007, 48(4): 9-10.
- [47] 吴灰全, 万瀚仁, 周萌. 武夷山茶叶生产的气候条件分析. *农业与技术*, 2014, 34(12): 122.
- Wu H Q, Wan H R, Zhou M. Analysis on climatic conditions of tea production in Wuyishan. *Agric Technol*, 2014, 34(12): 122.

## High Temperature Heat Damage Grade Index of Tea Plants and Its Distribution Characteristics in Southern Yangtze River and South China

Li Xin<sup>1)</sup> Wang Peijuan<sup>1)</sup> Tang Junxian<sup>1)2)</sup> Wang Qi<sup>1)</sup> Li Yang<sup>1)</sup> Huo Zhiguo<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup>(Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

### Abstract

With the trend of global climate change, it is important to study the high temperature heat damage of tea plants and analyze the spatial and temporal distribution characteristics to warn damage early and reduce production losses. An index is established based on daily maximum air temperature and historical heat damage disaster records at 510 meteorological stations over tea regions in Southern Yangtze River and South China from 1961 to 2022, to determine and verify the extent of high temperature heat damage, using methods of disaster inversion and K-means clustering analysis method. The spatial and temporal distribution characteristics of high temperature heat damage are analyzed. The total days with moving average of 14-consecutive-day maximum temperature above 34.5 °C are statistically analyzed, and for mild, moderate and severe high temperature heat damage, the value is in the range of 1–17 d, 18–38 d and above 38 d, respectively. The accuracy rate of complete compliance with the validation sample is 73.9%, and the accuracy rate of basic compliance is 91.3%. The total number of heat damage on tea plants in Southern Yangtze River and South China shows fluctuating changes from 1961 to 2022. The total number of heat damage on tea plants in tea regions of Southern Yangtze River and South China is the lowest in 1999 and 1997, respectively, while numbers are the highest in 2021 for both tea regions. Compared to tea regions of Southern Yangtze River, there are more high temperature heat damages in South China, especially mild high temperature heat damages. Moreover, the number of high temperature heat damage on tea plants in South China shows a significant increasing trend in the past 62 years, but the trend of changes in the number of high temperature heat damage on tea plants in most tea regions of Southern Yangtze River is not significant.

**Key words:** high temperature heat damage of tea plants; grade index; spatial and temporal distribution characteristics; tea regions in Southern Yangtze River and South China