

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.042

# 茶园防霜机不同时间尺度作用效果研究\*

胡永光<sup>1</sup> 朱霄岚<sup>1</sup> 赵梦龙<sup>1</sup> Richard L Snyder<sup>2</sup> 李萍萍<sup>3</sup>

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 加利福尼亚大学(戴维斯)农业与环境科学学院, Davis 95616; 3. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

**摘要:** 在发生晚霜的茶园中, 试验研究了防霜机不同时间尺度启闭的防霜效果。在茶树萌芽前不同天数、降温前和日出后不同时间, 分别设定开始启用和启闭防霜机的处理, 测定其对茶树生长、冠层温度和防霜范围的影响。结果表明: 在茶树萌芽前 20、15、7 d 开始启用防霜机, 使新梢长度、芽密度和百芽质量均比对照增加 20% 以上; 防霜机在降温前 2.0、1.5、1.0 h 启动, 对茶树防霜效果更显著, 作用半径比对照增大 60% 以上; 防霜机在日出后 2.0、1.5、1.0 h 延停, 在开始的 1 h 内可平均减缓冠层升温 45.76%, 并减小茶树叶片光合强度的降幅。所以, 晚霜时为保持茶树较好的长势和产量, 应在茶树萌芽前不少于 7 d 开始启用防霜机, 且合适的启动和延停时机分别为降温前 1.0 h 和日出后 1.0 h。

**关键词:** 防霜机 时间尺度 晚霜冻 茶树 防霜效果

**中图分类号:** S224.3; S425 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0252-06

## Operation Effects of Wind Machines for Frost Protection of Tea Trees on Different Time Scales

Hu Yongguang<sup>1</sup> Zhu Xiaolan<sup>1</sup> Zhao Menglong<sup>1</sup> Richard L Snyder<sup>2</sup> Li Pingping<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China 2. College of Agricultural and Environmental Sciences, University of California(Davis), Davis 95616, USA 3. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

**Abstract:** Frost protection effect experiments in tea fields were conducted according to wind machine operation timing on different time scales. The treatments of starting to use wind machines before tea sprouting, starting before frost occurrence and stopping after sunrise were set up respectively. And the impact of wind machine operation on the growth of tea trees, temperature rise in the canopy and protection coverage was measured. The results indicated that starting to use wind machines 20 d, 15 d and 7 d before tea sprouting increased the length of young shoot, bud density and 100-bud weight by over 20% compared with the control test; Starting wind machines 2.0 h, 1.5 h and 1.0 h before frost occurrence led to better protection and enlarged the coverage radius by more than 60% compared with the control test. Delayed stopping of wind machines by 2.0 h, 1.5 h and 1.0 h after sunrise reduced the temperature rise of the canopy by 45.76% in the first hour, and narrowed the reduction of the photosynthetic intensity of tea leaves. Therefore, to protect tea trees from late frost cold for better growth and yield, the appropriate application of wind machines should be more than 7 d prior to the tea budding, and the operation timing of starting and stopping for a certain frost event should be 1.0 h before frost occurrence and 1.0 h after sunrise, respectively.

**Key words:** Wind machines for frost protection Time scale Late frost cold Tea trees Frost protection effects

收稿日期: 2013-10-09 修回日期: 2013-10-23

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA10A508)、国家自然科学基金资助项目(31101089)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2010326)、江苏省农业科技自主创新资金资助项目(CX(12)3025)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201303012)

作者简介: 胡永光, 副教授, 博士, 主要从事设施农业装备与技术研究, E-mail: deerhu@163.com

通讯作者: 李萍萍, 教授, 博士生导师, 主要从事设施农业生态研究, E-mail: lipingping@ujs.edu.cn

## 引言

早春晚霜冻害频发致使名优茶大幅减产、品质下降,造成茶叶生产的巨大经济损失<sup>[1-3]</sup>。国外开发了基于气流扰动的防霜装备与技术,如日本的高架防霜机、美国的塔式风机、澳大利亚的直升飞机和乌拉圭的吸排式防霜风筒<sup>[4-7]</sup>。国内胡永光等自主研制了茶园防霜机及其控制系统,并进行防霜效果的性能测试<sup>[8-9]</sup>。但以上防霜装备的运行,均是采用作物临界低温上下限进行简单控制。Snyder<sup>[6]</sup>提出风速可作为判定防霜机是否启动的条件之一,即当风速大于 2.5 m/s 时,由于逆温消失而关闭系统。Ribeiro 等<sup>[5]</sup>基于能量平衡评价防霜机启动后的升温效果,根据逆温强度确定系统启闭时机,当地面 1.5 m 高处的温度低于临界温度即可启动。另一些研究则通过预测最低气温、露点温度或者冠层/叶片温度等,确定霜冻的发生,从而启动防霜措施<sup>[10-13]</sup>。但这些方法均需要大量的历史和实时气象资料,实现难度大,且无法确定具体的启闭时刻。胡永光<sup>[14]</sup>提出基于临界低温的逆温差控制策略,使防霜机节能运行,并认为在逆温消失(反逆温)融霜阶段,应以气温和时段为限制条件,控制其延时关闭,以缓解霜冻融解过程,避免霜冻害进一步加剧。但该研究未给出具体的控制参数,缺乏试验的验证。

现行防霜实践中,均是在茶树萌芽期才开始启用防霜机,但此前茶树叶片若遭遇霜冻,叶绿体受损,会对后期茶芽的生长发育造成影响。而茶树萌芽期前约 14 d,其植株含水率开始增加,耐冻性逐渐降低<sup>[15]</sup>。因此,在长时间尺度上,需确定防霜机启用的合理时机。另一方面,在晚霜发生时,若提前启动防霜机,会增加使用成本,若在降霜后启动,则会存在冻害的风险;霜夜次日凌晨逆温消失后,由于日出后温度快速回升,可能对茶树造成应激伤害<sup>[16]</sup>。所以,在霜夜短时间尺度上,仍需确定合理的启闭时机。前期试验研究发现,防霜机提前启动时机的不同,也会使其防霜作用范围有所不同。

本文以茶园防霜机为对象,试验研究其在不同时间尺度下启用和启闭,对茶树冠层温度、光合作用以及生长性状等的影响,从而为防霜机运行时机的决策提供依据。

## 1 逆温气流扰动防霜方法

茶园的晚霜冻害主要由辐射逆温引起,随着地面强烈辐射冷却而形成。茶园中土壤和茶树白天吸收大量的太阳短波辐射,在晚间热量以长波形式不断向天空放射。在晴朗、无风、无云或少云的夜晚,

地面及茶树因强烈的有效辐射而很快冷却,使得贴近地面的气层也随之降温,由于靠近地面的气层比远离地面的气层降温更快,于是形成空气温度场上高下低的逆温现象<sup>[15]</sup>。图 1 为 2013 年 3 月 20 ~ 21 日的茶园近地气温场变化动态,在距离地面 12 m 高度范围内,气温随高度增加反而下降,逆温层上下方的最大温差可达 4.9℃。

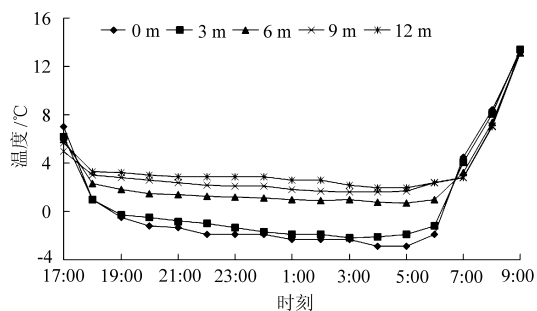


图 1 茶园近地气温变化动态

Fig. 1 Temperature variation near ground in tea fields

因此,利用上述逆温温度场分布特征,通过防霜机扰动近地逆温层空气,将上方暖空气强制对流至茶树冠层,可有效提高其温度,从而避免或减轻霜害<sup>[5-6]</sup>。

在图 1 的 6:00 ~ 7:00 时段,日出 0.5 h 后各高度趋于相同气温,逆温消失,形成反逆温。冠层处温度在日出后 1.0 h 内迅速增高约 7℃。结冰的植株在气温缓慢回升时,对细胞的影响不会太大;但若气温骤然回升,冰晶迅速解冻,细胞壁易于快速回复,而原生质来不及吸水膨胀,结果可能撕裂损伤<sup>[17]</sup>。为此,在防霜实践中常将烟熏作业延停至日出后 1.5 ~ 2.0 h,或将喷水作业延停至日出后湿球温度高于其临界冻害温度以上<sup>[18]</sup>。同样地,日出后延停防霜机,继续扰动近地逆温层空气,将上方冷空气强制对流至茶树冠层,可以延缓其温度的快速回升,从而防止发生二次的解冻伤害。

## 2 材料与方方法

### 2.1 试验材料

试验于 2013 年 2 ~ 3 月在江苏省丹阳市迈春茶场(北纬 32°01'37",东经 119°40'17",海拔高度 18 m,属丘陵平地)进行。供试茶树品种为龙井 43,树龄约 7 年。使用如图 2 所示的 DFC1030-3K 型防霜机(日本 Fulda 公司),其技术参数如表 1 所示。其他测试仪器和设备有:ZDR-3WIS 型温度自动记录仪(杭州泽大公司),测量精度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,测量范围  $-50 \sim 100^\circ\text{C}$ ; NK4000 型便携式风速计(美国 Nielsen-Kellerman 公司),风速测量精度  $\pm 0.1 \text{ m/s}$ ,测量范围 0.4 ~ 40 m/s; WatchDog 2900ET 型气象站

(美国 Spectrum 公司),测量参数有空气温湿度、辐射、风速风向、雨量等;Li-6400XT 型便携式光合测定仪(美国 LI-COR 公司);卷尺等。



图2 试验茶场与防霜机

Fig.2 Experiment tea field and wind machines for frost protection

表1 试验用防霜机技术参数

Tab.1 Specifications of wind machines for frost protection

| 安装高度 | 风叶直径 | 电动机功率 | 风量                                 | 防霜面积            |
|------|------|-------|------------------------------------|-----------------|
| /m   | /m   | /kW   | /m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> | /m <sup>2</sup> |
| 7    | 1    | 2.48  | 2 800                              | 800             |

## 2.2 试验方法

为确定防霜机合理的运行时机,在整个晚霜季节,分别进行了长、短时间尺度上防霜机启用和启动,以及日出后防霜机延时关闭,对防霜效果的影响试验。拟通过测定茶树叶片光合强度、冠层温度、生长性状指标和防霜范围,比较不同运行时机的防霜效果。

### 2.2.1 长时间尺度启用试验

(1)启用时机处理的设置:选择位于不同地块的4台防霜机,设定茶树萌芽前20、15、7和0d开始启用的4个处理,使用至一芽一叶期。

(2)茶树叶片光合测定:从各处理防霜机前15m处选取3株茶树,选定枝条上端第3张叶片并标记,于茶树萌芽前20d的上午9:00~11:00,测定其净光合速率( $P_n$ ),重复3次取平均作为对照组。然后在萌芽期同样时段,测定各处理标记叶片的 $P_n$ ,重复3次取平均作为处理组。

(3)茶叶生长性状观测及测定:每个处理随机选取20个未萌发的芽头,并标记,观察其萌芽期。在一芽一叶期,分别统计各处理的新梢长度、芽密度和百芽质量。

### 2.2.2 短时间尺度启动试验

(1)启动时机处理的设置:选择位于不同地块的5台防霜机,设定降霜前2.0、1.5、1.0、0.5和0h开始启动运行的5个处理,运行至次日凌晨同时关闭。另外设置1个不启动防霜机的处理,作为对照。

(2)茶树冠层温度测定:在降霜日按照各处理的时机启动防霜机,并每隔0.5h测定防霜机前15m远处的茶树冠层气温。

(3)茶树叶片光合测定:从各处理防霜机前15m处选取3株茶树,选定枝条上端第3张叶片并标记,于降霜当日上午9:00~11:00,测定其 $P_n$ ,重复3次取平均作为降霜前组;然后在降霜后次日上午同一时段,测定各处理标记叶片的 $P_n$ ,重复3次取平均作为降霜后组。

(4)防霜作用范围测定:在第1次霜夜,选用的5台防霜机均在降霜前0h启动;在第2次霜夜,分别设定各防霜机于降霜前2.0、1.5、1.0、0.5和0h启动的5个处理。在2次降霜后次日凌晨6:00,用卷尺测量每个处理扇形作用范围的半径。以提前0h开启作为对照组。

### 2.2.3 日出后延停试验

(1)延停时机处理的设置:选择位于不同地块的5台防霜机,在日出时刻同时启动运行,设定日出后0、0.5、1.0、1.5和2.0h延停5个处理,并将0h延停的处理作为对照。

(2)茶树冠层温度测定:在降霜日按照各处理的时机延停防霜机,并每隔0.5h测定防霜机前15m远处的茶树冠层气温。

(3)茶树叶片光合测定:从各处理防霜机前15m处选取3株茶树,选定枝条上端第3张叶片并标记,于试验前1日上午9:00~11:00,测定其 $P_n$ ,重复3次取平均作为降霜前组;然后在试验当日上午同一时段,测定各处理标记叶片的 $P_n$ ,重复3次取平均作为降霜后组。

## 3 结果与分析

### 3.1 长时间尺度启用结果

#### 3.1.1 启用时机对茶树光合作用的影响

在实施4个处理前后,分别测定对照组和处理组的净光合速率,结果如表2所示。处理组与对照组相比, $P_n$ 及其下降率随着防霜机启用时机的提前,均逐渐减小;0d处理的下降率最大,为31.54%,但20、15和7d处理的下降率均较小,且差异较小。所以,防霜机应在茶树萌芽前不少于7d开始启用。

#### 3.1.2 启用时机对茶树生长性状的影响

在各处理实施过程中,观测茶树生长的物候期,并测定一芽一叶期的生长性状,结果如表3所示。与对照(0d)相比,其他处理可使萌芽期和一芽一叶期提前2~3d;而茶树的新梢长度、芽密度和百芽质量等生长性状指标,比对照均有大幅增加,平均增幅分别为27.63%、34.42%和24.21%。这说明在降

霜时使用防霜机,更有利于新芽成活。百芽质量表征了茶鲜叶的产量,与对照相比,20、15 和 7 d 处理的百芽质量分别增加了 27.26%、23.68%、21.70%。为使以上各生长指标保持 20% 以上的增幅,防霜机的启用时机应在茶树萌芽前不少于 7 d。

表 2 长时间尺度启用的茶树叶片净光合速率  
Tab.2 Net photosynthetic rate of tea leaves with wind machines on a long-time scale

| 试验组   | 萌芽前天数/d |      |       |       |
|-------|---------|------|-------|-------|
|       | 20      | 15   | 7     | 0     |
| 对照组   | 6.03    | 5.73 | 5.93  | 6.31  |
| 处理组   | 5.81    | 5.40 | 5.27  | 4.32  |
| 下降率/% | 3.65    | 5.76 | 11.13 | 31.54 |

表 3 启用时机对茶树生长性状的影响

Tab.3 Impact of wind machines operation timing on the growth of tea trees

| 处理/d  | 萌芽期<br>/月-日 | 一芽一叶期<br>/月-日 | 新梢长度<br>/cm | 芽密度<br>/个·m <sup>-2</sup> | 百芽质量<br>/g |
|-------|-------------|---------------|-------------|---------------------------|------------|
| 20    | 02-23       | 03-22         | 9.05        | 215                       | 25.63      |
| 15    | 02-23       | 02-23         | 8.96        | 209                       | 24.97      |
| 7     | 02-24       | 03-23         | 8.63        | 197                       | 24.51      |
| 0(CK) | 02-26       | 03-25         | 7.01        | 154                       | 20.14      |

### 3.2 短时间尺度启动结果

#### 3.2.1 启动时机对茶树冠层温度的影响

3月3~4日0:00开始降霜,实施在此前2.0、1.5、1.0、0.5和0h分别启动防霜机的5个处理,测定以上处理及对照处理(防霜机一直未启动)相应的茶树冠层温度变化,如图3所示。在23:00~6:00时段,对照处理的茶树冠层温度,一直处于最低,实际观测到该处理的霜冻害最严重。由图3可知,降霜时提前启动防霜机的时机,对茶树冠层温度产生重要的影响。其中,2.0和1.5h处理的温度及变化基本相同,在23:00~2:00时段,其温度均高于其他处理,但在其启动至23:00时段,温度与其他处理基本相同,表明其在该时段的运行未能影响茶树冠层的温度。

从早春开始,越冬茶树的耐冻性逐渐降低,在萌芽期约-3℃、1~2叶期约-2℃的低温胁迫下,叶和芽会遭受冻害<sup>[15,19]</sup>。试验中,1.0h处理在23:00启动后,可使茶树冠层温度一直保持在临界冻害温度(-2℃)之上,但0.5或0h处理已不能使冠层温度一直高于临界冻害温度。

#### 3.2.2 启动时机对茶树光合作用的影响

在实施5个处理前后,分别测定降霜前组和降霜后组的净光合速率,结果如表4所示。降霜前组

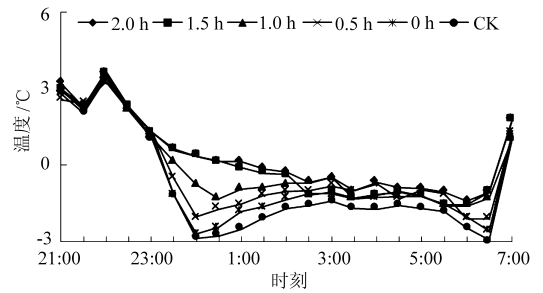


图 3 各启动时机的茶树冠层温度变化

Fig.3 Temperature variation in the tea canopy with different treatments of operation timing

与降霜后组相比, $P_n$ 及其下降率随着防霜机启动时机的提前,除2.0h处理外均逐渐减小;对照处理(防霜机一直未启动)的下降率最大,为49.77%;2.0、1.5和1.0h处理的下降率均小于20%,且差异较小,而0.5和0h处理的下降率均超过30%。所以,防霜机应在降霜前1.0h开始启用。

表 4 短时间尺度启动的茶树叶片净光合速率

Tab.4 Net photosynthetic rate of tea leaves with operation of wind machines on short-time scale

| 试验组   | 降霜前时间/h |       |       |       |       |       |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 2.0     | 1.5   | 1.0   | 0.5   | 0     | CK    |
| 降霜前   | 6.75    | 6.54  | 6.76  | 6.45  | 6.93  | 6.61  |
| 降霜后   | 5.93    | 5.78  | 5.54  | 4.27  | 4.27  | 3.32  |
| 下降率/% | 12.15   | 11.62 | 18.05 | 33.80 | 38.38 | 49.77 |

#### 3.2.3 启动时机对防霜作用范围的影响

2月15~16日第1次降霜和3月3~4日第2次降霜时,启动各处理防霜机后,分别测定两次防霜的作用半径,结果如图4所示。以试验处理的两次防霜作用半径的相对增幅为指标,以0h处理为对照,对各处理结果进行比较分析。可知,0h处理的作用半径仅增加了3.2%,2.0、1.5、1.0h处理的作用半径增幅显著,分别为65.8%、62.4%、60.2%,且相互差异较小;而0.5h处理的作用半径仍增加16.1%。由此可知,降霜时提前启动防霜机,对防霜作用的范围有显著影响,实际生产中在降霜前1.0h启动防霜机,即可较好地增大防霜范围。

### 3.3 日出后延停防霜结果

#### 3.3.1 延停时机对茶树冠层温度的影响

3月21日凌晨有霜,日出时间为6:05,实施日出后0、0.5、1.0、1.5和2.0h停止运行防霜机的5个处理,测定以上处理相应的茶树冠层温度变化,如图5所示。可知,在日出后2h内,茶树冠层温度从-2.3℃快速升高至8.6℃,增幅达10.9℃;0h处理(CK)在对应冠层温度回升至0℃的前后0.5h

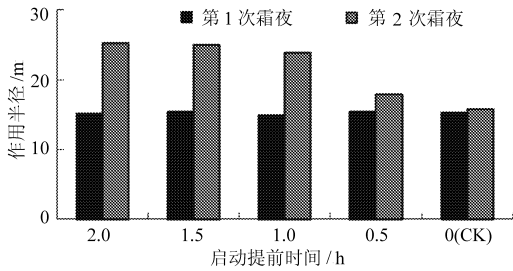


图4 短时间尺度启动的防霜作用半径

Fig. 4 Coverage radius of frost protection with operation of wind machines on short-time scale

内,其温升变化率高达  $5.9^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ,极易造成茶树叶片的应激伤害;在日出后 1 h 内,1.0、1.5 和 2.0 h 的处理的冠层温度及其变化基本相同,且温升变化率均小于 0 和 0.5 h 处理,表明此 3 个处理可更好地防止解冻伤害。

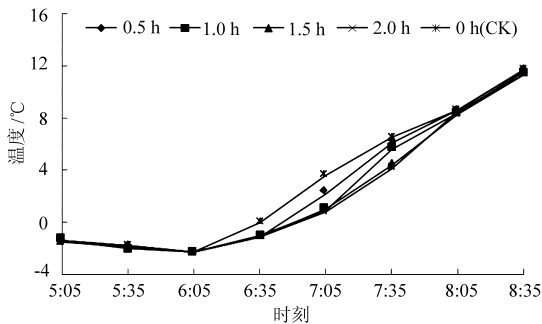


图5 各延停时机的茶树冠层温度变化

Fig. 5 Temperature variation of the tea canopy with different delayed stops of wind machines

### 3.3.2 延停时机对茶树光合作用的影响

在实施 5 个处理前后,分别测定标记茶树叶片净光合速率,作为降霜前组和降霜后组,结果如表 5

所示。降霜前组与降霜后组相比, $P_n$ 及其下降率随着防霜机延停时机的推后,均逐渐减小;0 h 处理(CK)的下降率最大,为 50.98%,表明若防霜机无延停,茶树会因快速回温造成的应激伤害而影响其生长;2.0、1.5 和 1.0 h 处理的下降率均小于 30%,且差异较小,而 0.5 h 处理的下降率超过 40%。所以,防霜机应在降霜前 1.0 h 开始启用。

表5 不同延停时机的茶树叶片净光合速率

Tab. 5 Net photosynthetic rate of tea leaves with different delayed stoppings of wind machines

| 试验组   | 日出后时间/h |       |       |       |       |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
|       | 2.0     | 1.5   | 1.0   | 0.5   | 0(CK) |
| 降霜前   | 6.63    | 6.57  | 6.97  | 6.54  | 6.61  |
| 降霜后   | 4.97    | 4.78  | 5.01  | 3.82  | 3.24  |
| 下降率/% | 25.04   | 27.25 | 28.12 | 41.59 | 50.98 |

## 4 结束语

针对茶树萌芽前后耐冻性的差异,以及气象逆温和反逆温的复杂变化,提出了在不同时间尺度上确定防霜机启用和启闭时机的方法,并确定了茶树萌芽前、降霜前和日出后合理的启闭时间。为保持茶树一定的光合作用强度,使茶树新梢长度、芽密度和百芽质量增幅 20% 以上,防霜机的启用时机应在茶树萌芽前不少于 7 d。为使茶树冠层温度不低于临界冻害温度,同时避免或减轻日出后快速升温导致的二次应激伤害,防霜机的启动时机应在降霜前 1.0 h,而延停时机应在日出后 1.0 h。

## 参 考 文 献

- 许映莲,张旭晖,李旭群. 苏南茶区晚霜冻与茶树冻害的研究[J]. 江苏农业科学,2012,40(8):236~238.  
Xu Yinglian,Zhang Xuhui,Li Xuqun. The research of tea tree freezing injure and tea late frost in Southern Jiangsu [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2012,40(8):236~238. (in Chinese)
- 杨书运. 茶树冻害防控方法的研究[D]. 合肥:安徽农业大学,2012.  
Yang Shuyun. Study on prevention and control method for tea plants freeze injury [D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2012. (in Chinese)
- 骆耀平. 茶树冻害的发生及防御[J]. 中国茶叶,2008,30(1):30~31.
- Furuta M,Araki S. Frost prevention fan apparatus having automatic folding type neck mechanism: JP,2007000096[P]. 2007-01-11.
- Ribeiro A C,Melo-Abreu J P,Snyder R L. Apple orchard frost protection with wind machine operation[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2006,141(2~4):71~81.
- Snyder R L,Melo-Abreu J P. Frost protection: fundamentals, practice, and economics—vol I[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations,2005.
- Yazdanpanah H,Stigter C J. Selective inverted sink efficiency for spring frost protection in almond orchards northwest of Isfahan, Iran[J]. Theoretical and Applied Climatology,2011,105(1~2):27~35.
- 李萍萍,戴青玲,胡永光,等. 早春逆温条件下茶园近地温度时空分布特征[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(1):39~42.  
Li Pingping,Dai Qingling,Hu Yongguang,et al. Temporal and spatial distribution characteristics of near ground temperature in tea farm under temperature inversion in early spring [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2008,24(1):39~42. (in Chinese)

Chinese)

- 9 胡永光,李萍萍,戴青玲,等. 茶园高架风扇防霜系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(12):97~99.  
Hu Yongguang,Li Pingping,Dai Qingling,et al. System design and experiment on elevated wind machine for tea frost protection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(12):97~99. (in Chinese)
- 10 Prabha T, Hoogenboom G. Evaluation of the weather research and forecasting model for two frost events[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2008,64(2):234~247.
- 11 Smith B A, Hoogenboom G, McClelland R W. Artificial neural networks for automated year-round temperature prediction[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2009,68(1):52~61.
- 12 Rossi F, Facini O, Loreti S, et al. Meteorological and micrometeorological applications to frost monitoring in northern Italy orchards [J]. Physics and Chemistry of the Earth,2002,27(23~24):1 077~1 089.
- 13 Ghaemi A A, Rafiee M R, Sepaskhah A R. Tree-temperature monitoring for frost protection of orchards in semi-arid regions using sprinkler irrigation[J]. Agricultural Sciences in China,2009,8(1):98~107.
- 14 胡永光. 基于气流扰动的茶园晚霜冻害防除机理及控制技术[D]. 镇江:江苏大学,2011.  
Hu Yongguang. Mechanism and control technology of late frost protection for tea plant through air disturbance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University,2011. (in Chinese)
- 15 静岡県農林水産部. 茶生産指導指針[M]. 静岡:静岡県経済農業協同組合連合会,2003.
- 16 何维勋,冯玉香,夏满强. 解冻速率对作物霜冻害的影响[J]. 应用气象学报,1993,4(4):440~445.  
He Weixun,Feng Yuxiang,Xia Manqiang. Effects of thawing rate on frost injury of crops[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology,1993,4(4):440~445. (in Chinese)
- 17 马克西莫夫. 马克西莫夫院士选集[M]. 周小民,译. 北京:科学出版社,1962.
- 18 奇尔科夫. 农业气象学基础[M]. 方至,译. 北京:气象出版社,1987.
- 19 朱秀红,马品印,王军. 日照地区茶树冻害气候原因分析[J]. 中国茶叶,2008,30(2):28~29.  
Zhu Xiuhong, Ma Pinyin, Wang Jun. Climatological analysis on developing freeze cold of tea trees in Rizhao region[J]. China Tea,2008,30(2):28~29. (in Chinese)

(上接第 261 页)

- 17 张强,卢潇,崔晓臣. 基于分簇的无线传感器网络数据聚合方案研究[J]. 传感技术学报,2010,23(12):1 778~1 782.  
Zhang Qiang, Lu Xiao, Cui Xiaochen. Research on the scheme of data aggregation based on clustering for wireless sensor network [J]. Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(12): 1 778~1 782. (in Chinese)
- 18 林蔚,祝启龙. 无线传感器网络节能型数据融合算法[J]. 哈尔滨工程大学学报,2011,32(10):1 386~1 390.  
Lin Wei, Zhu Qilong. Energy-efficient data fusion algorithm of wireless sensor networks [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(10): 1 386~1 390. (in Chinese)
- 19 熊迎军,沈明霞,陆明洲,等. 温室无线传感器网络系统实时数据融合算法[J]. 农业工程学报,2012,28(23):160~166.  
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Lu Mingzhou, et al. Algorithm of real time data fusion for greenhouse WSN system [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 160~166. (in Chinese)
- 20 Chen H, Mineno H, Mizuno T. Adaptive data aggregation scheme in clustered wireless sensor networks [J]. Computer Communications, 2008, 31(15): 3 579~3 585.
- 21 Nesa Sudha M, Valarmathi M L, Babu A S. Energy efficient data transmission in automatic irrigation system using wireless sensor networks[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2011,78(2):215~221.
- 22 Wei G, Ling Y, Guo B, et al. Prediction-based data aggregation in wireless sensor networks: combining grey model and Kalman filter[J]. Computer Communications,2011,34(6):793~802.
- 23 Yager R R. The power average operator[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 31(6): 724~731.