

茶树喷灌防霜中植株储水/冰量动态变化与影响因素研究

潘庆民 鹿永宗 张志 金矿 宋佳伟 胡永光

(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 喷灌是园艺作物有效的防霜技术之一。为确定茶树喷灌防霜需水量和节约水资源,需研究喷灌过程中植株的储水/冰量动态变化及影响因素。本文设计了一种防滴落、茎秆水收集及称量组合装置,可直接精确获取整株茶树的储水/冰量;试验分析非冻结和冻结、微量和摇臂2类喷头条件下储水/冰量变化的异同;最后探究了冻结下微量喷头喷灌时长对储冰量和茎秆水量的影响。研究结果表明,非冻结条件下,茶树储水量变化经历积累、动平衡和干燥3个阶段;冻结条件下的储冰量随喷灌进行持续增加,并在停喷后较长时间内保持不变,即积累和保持阶段,随后依次经历融化流失和干燥阶段;相同喷灌压力和时长下,微量喷头的储水量和储冰量分别是摇臂喷头的1.2倍和2.0倍;微量喷头喷灌时长对最大储水量无明显影响,约为0.22 kg,最大储冰量则随喷灌时长的增加而显著增加,1.5 h的储冰量是0.5 h的2.9倍。微量喷头作用的茎秆水量,在非冻结和冻结条件下也较高,分别是摇臂喷头的3.0倍和2.7倍。本文研究了茶树植株表面储水/冰量变化及影响因素,改进了灌木类植物冠层截留量的测量方法,为提升防霜效果和实现精准喷灌奠定了基础。

关键词: 茶树; 防霜; 喷灌; 冠层截留; 储水量; 储冰量

中图分类号: S425 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)02-0180-08

OSID:



Variation and Influencing Factors of Water/Ice Storage within Tea Plant during Frost Protection Sprinkling

PAN Qingmin LU Yongzong ZHANG Zhi JIN Kuang SONG Jiawei HU Yongguang

(School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Frost damage often occurs in early spring night, causing huge economic losses to the famous tea industry. Sprinkler irrigation is an effective method of frost protection, which works by maintaining leaf and bud temperatures above the critical temperature through spraying water onto the tea plant and releasing latent heat as it freezes. This method has lower economic input and labor intensity compared with other methods, and sprinkler systems can also be used for irrigation, and fertilization. However, research is still lacking on the storage of water and ice on the surface of tea trees during irrigation to prevent freezing. A tea tree was planted in pot and placed on a high-precision electronic scale to enable weighing of water mass on tea plant surface during sprinkler irrigation. An umbrella cloth was used to keep out sprinkler water from falling into the pot or onto the electronic scale. The patterns of water and ice storage on the tea tree surface under non-freezing ($4.0 \sim 8.0^{\circ}\text{C}$) and freezing conditions ($-5.0 \sim 0^{\circ}\text{C}$) were explored and the effects of sprinkler irrigation duration and nozzle type were analyzed. The results showed that the water storage in tea plants under non-freezing conditions went through three stages of accumulation, dynamic equilibrium and drying respectively; while ice storage under freezing conditions went through four stages of accumulation, retention, melting loss and drying. The tea tree surface was constantly renewed through icing, allowing the sprinkler water to be retained. Under the same irrigation pressure and duration, the water storage and ice storage capacity of micro-sprinkler were 1.2 times and 2.0 times of that of impact sprinkler, respectively. The maximum water storage capacity was about

收稿日期: 2023-07-05 修回日期: 2023-08-03

基金项目: 中国博士后基金面上项目(2022M711396)、江苏省高等学校自然科学研究面上项目(21KJB210019)、江苏省研究生科研创新训练项目(KYCX22_3683)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD-2018-87)

作者简介: 潘庆民(1995—),男,博士生,主要从事防霜装备及技术研究,E-mail: 2112116011@stmail.ujs.edu.cn

通信作者: 胡永光(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事茶果园生产技术与装备研究,E-mail: deerhu@163.com

0.22 kg, but the maximum ice storage was increased significantly with the increase of irrigation duration. The ice storage of sprinkling 1.5 h was 2.9 times of that of 0.5 h. The stem water volume of the micro-sprinkler was higher under non-freezing and freezing conditions, which was 3.0 times and 2.7 times that of the impact sprinkler, respectively. The water and ice storage on the tea tree surface under different conditions was investigated, a method for measurement of shrub canopy interception was proposed, which laid the foundation for further determining the water required for sprinkler irrigation to prevent frost and optimizing the sprinkler irrigation method.

Key words: tea tree; frost protection; sprinkler irrigation; canopy interception; water storage; ice storage

0 引言

频发的早春霜冻害,不仅影响许多经济作物的花期^[1-2],也会对茶芽产生冻伤进而导致品质降低和经济损失^[3-4]。为防止或减轻茶树霜冻害,气流扰动(直升机、高架风机)、覆盖和喷灌等防霜技术得到研究和应用^[5]。其中,喷灌防霜的工作原理是利用液态水结冰时释放出潜热,使植株的叶和芽温保持在临界温度 $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$ (暴露 30 min 出现受损或死亡的温度)以上^[6-7]。与其它防霜方法相比,喷灌防霜具有受天气条件限制小、劳动强度低的特点,该系统还可同时用于灌溉、施肥和缓解热害等。

对不同农作物喷灌防霜的应用研究主要关注于自动喷灌系统设计、参数优化和节水量等方面。HEISEY 等^[8]设计的自动喷灌系统在霜夜能够保持苹果芽的温度在临界温度之上。STOMBAUGH 等^[9]发现使用微量喷头灌溉可以提高草莓的防霜效果,连续喷灌下花的冻死率从 52% 降低为 3%。ANCONELLI 等^[10]对比探究霜夜中使用 2 种喷头喷灌对环境温度的影响,结果表明微量喷头有较好的温升效果。OLSZEWSKI 等^[11]试验表明循环喷灌防霜能提高蔓越莓产量并节约喷灌用水量。KOC 等^[12]根据环境参数及芽温而设计的自动喷灌系统在 3 次霜冻事件中平均节水 72%。HAMER^[13]和 GHAEMI 等^[14]设计了自动调节喷灌速率的喷灌系统,试验发现相对持续喷灌方式节水超过 50%。由此可见,在确保防霜效果的同时,实现精准喷灌和节约用水也是主要研究目标。然而,茶树在喷灌中其表面水量、冰量及相关影响规律尚不确定。

降雨或喷灌输入的总水量包括作物棵间穿透水量、茎秆水量和冠层截留^[15]。穿透水量指直接穿透而不接触作物或接触后滴落的水分;茎秆水量为沿着作物茎秆表面向根部流动的水分;作物叶片和茎秆表面稳定储存一定水分,这部分水被称为冠层截留。由于霜夜气温较低,可忽略冠层内蒸发量^[16]。JIAO 等^[17]发现苜蓿冠层的截留量随叶面积指数和喷灌强度增加而增加。郭建平等^[18]研究表明在降

雨过程中玉米冠层截留量与叶面积指数平方及降水量对数函数拟合相关最佳。ZHENG 等^[19]研究发现玉米的茎秆水量和冠层截留量在整个生长季中分别为 22.3% 和 12.5%,降水强度越小,穿透水量和茎秆水量百分率越低。徐宁等^[20]分析了大豆冠层对水分分布的影响,指出茎秆水量(15.02%)及穿透量(83.94%)在降雨再分配中起主要作用。在农业灌溉中,喷灌水存留在农作物植株上导致抗旱灌溉效率降低^[21]。但当喷灌用于防霜时,适量的喷灌水储存于植株上是实现防霜的关键,因为水量较少时无法提供足够的热量,而过量的水结冰后会导致枝条折断^[7]。现有喷灌防霜研究中并未对植株储存水/冰的量进行直接精确测量。

茶树多为灌木,针对灌木或乔木冠层截留量的测量方法主要有 2 种:采集树木枝条并悬于拉力计下,以实现在喷灌或模拟降水中对冠层截留量直接称量^[22-26];另一种是根据水量平衡原理,即测量林外的降水量和林内的次降水量(穿透水量),将两者之差作为冠层截留量^[27-28]。然而,上述 2 种方法均不能在自然霜冻条件下,对田间完整茶树植株表面的储水/冰量进行直接精确测量。为排除茎秆水和穿透水的影响,设计防滴落和茎秆水收集组合装置,可实现对田间完整的灌木型茶树截留量的测量。

本文基于改进的灌木类植物截留量测量方法,对非冻结及冻结条件下,完整茶树植株的储水/冰量及茎秆水量进行测量,对比 2 类喷头的差异并分析喷灌时长的影响。以期加深对茶树在喷灌防霜过程中水分截留过程的认识,为优化喷灌参数、提升防霜效果和实现精准喷灌奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 茶树样品及研究区域

田间试验于 2022 年 12 月 21 日至 2023 年 1 月 4 日,在江苏省丹阳市吟春碧芽茶园($32^{\circ}02'35''\text{N}$, $120^{\circ}08'20''\text{E}$)内进行。此时段的霜冻类型与早春倒春寒期间的相同,均为辐射型霜冻。该地区属半干旱区,亚热带季风气候,年平均降水量 560 mm,年平

均气温为 12.9℃。茶树品种为茂绿 (*C. sinensis* cv. *Maolu*), 树龄为 12 a, 株高 50 cm, 冠层每年修剪 2~3 次, 冠层形态呈圆蓬形, 俯视时冠层为圆形, 半径约为 40 cm, 状态健康, 无病虫害, 茎杆表皮无破损。

1.2 试验装置及方法

试验装置如图 1a 所示。受试茶树安置于种植盆内, 其主茎杆中心距喷灌支管 2.8 m, 在茶树主茎杆底部四周使用防水密封胶固定锥型塑料圈并在其一侧开小孔, 孔内插入一段硬质管作为排水管接口, 该接口外壁与锥型塑料圈之间固定密封, 如图 1b、1c 所示。将一足够长软管套插于接口上, 另一端放入收集瓶内。种植盆放置在精密天平(精度 0.2 g, 东莞市怡雪电子有限公司)上, 该天平具有数据存储功能, 开启后以 1 次/s 的频率记录质量。茶树四周布置 8 根不锈钢管, 均插入地下固定。4 根钢丝的两端分别插入茎杆两侧钢管中, 均呈拱桥型并略高于自制漏斗的顶部。钢管分布并不严格对称, 因此钢丝在茶树主茎杆附近形成空隙而不接触。将雨伞的圆伞面沿径向剪开后放置在钢丝上再用防水胶带密封开口缝隙。茶树冠层高度处温度采用温度传感器(型号: ZDR-3WIS, 精度: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 杭州泽大仪器有限公司)每分钟记录 1 次。试验采用 2 种喷灌喷头, 分别为微量喷头(图 2a)和摇臂喷头(图 2b), 前者喷灌半径为 4.0 m, 后者为 7.0 m。在确保喷灌压力(2.5 MPa)相同时, 不同喷头在茶树处的喷灌强度使用直量式雨量筒(范围: 0~25.0 mm, 精度: 0.1 mm, 泰州市中泰教学装备有限公司)测量。

试验时首先开启精密天平, 再开启喷灌系统。穿透和滴落的水落至伞面进而流入四周土壤中, 而不会落入种植盆内, 同时该部分受到地面支撑且与茎杆无接触, 不会对称量过程产生影响。茎杆表面多余的水分形成茎杆流, 沿茎杆流入自制漏斗内, 随即通过排水管输送至收集瓶。通过上述 2 个装置共同作用, 储存在叶片和茎杆上的水即可被称量。喷灌结束后, 称量收集瓶内水的质量作为该次试验的茎杆水量。对采集的冠层储水/冰量数据每 60 个数据(数据间隔 1 s)取平均值作为一个数据点, 得到冠层储水/冰量随时间的变化曲线。此方法同样适用于其它灌木类植物冠层截留量的研究。

1.3 茶树表面积测量

茶树表面积采用试验后破坏性测量的方法^[26]测量, 将茶树茎杆剪断成 2.0~10.0 cm 的小段, 每段简化为圆柱体, 使用游标卡尺(精度: 0.02 mm)测量直径, 采用毫米刻度尺(精度: 0.1 mm)测量每根茎杆的长度。需要说明的是, 图 3a 中底部一排较细

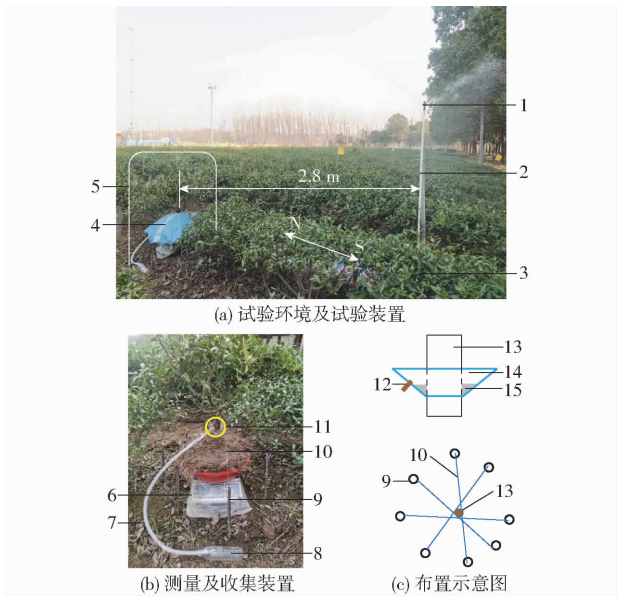


图 1 试验装置及相关示意图

Fig. 1 Test equipment and schematic

1. 喷头 2. 喷灌支管 3. 茶行 4. 伞面 5. 受试茶树 6. 高精度电子秤 7. 排水管 8. 收集瓶 9. 钢管 10. 钢丝 11. 自制塑料漏斗 12. 排水管插口 13. 茶树主茎杆 14. 锥型塑料圈 15. 防水密封胶



图 2 试验所用喷头

Fig. 2 Sprinklers used in test



图 3 茶树茎杆和叶片

Fig. 3 Stalk and leaves of tea tree

的茎杆末梢, 其直径相似且数量较多, 因此随机抽取 30 根, 使用游标卡尺测量直径后取平均值作为所有末梢的直径。

采摘该棵茶树的所有叶片, 每 15 片一组, 均匀放置后正视拍照, 如图 3b 所示。使用图像处理方法测量叶片总面积^[26]: 利用 ImageJ 软件测量叶片的面积, 首先将图像转换为 8 bit 格式再进行二值化处

理,得到叶片的边缘轮廓,测量面积时采用的比例为 69 像素/cm。将测量出的每片叶片面积求和作为该棵茶树的叶片表面积(单面)。

1.4 喷灌防霜过程分析

当环境温度在冰点温度之上时,喷灌水不断被喷洒到茶树表面,茶树表面储存水量满足公式

$$\frac{dM_{H_2O}}{dt} = M_{H_2O, in} - M_{H_2O, out} \tag{1}$$

式中 M_{H_2O} ——茶树表面储存的水量,kg
 $M_{H_2O, in}$ ——抵达茶树表面的所有水量,kg
 $M_{H_2O, out}$ ——从茶树表面流失的水量,kg

理想状态下,即茶树表面均匀覆盖一层水膜时^[26],茶树叶片表面储存的液态水质量为

$$M_{H_2O, l} = SA\rho_w \tag{2}$$

$$\frac{dS}{dt} = i - f \tag{3}$$

式中 $M_{H_2O, l}$ ——茶树叶片表面储存的液态水质量,kg
 S ——水膜厚度,mm
 A ——茶树表面积,mm²
 ρ_w ——水的密度,g/mm³
 i ——喷灌强度,mm/h
 f ——水从茶树表面流失的速率,mm/h

当喷灌水在叶片上结冰时,H₂O 的质量可认为是由冰和少量未凝固的液态水组成,计算式为

$$M_{H_2O} = M_{H_2O, l} + M_{H_2O, s} \tag{4}$$

式中 $M_{H_2O, s}$ ——固态水(即冰)质量,kg

茶树叶片表面能量平衡公式为^[7]

$$Q_s + Q_L = R_n + H_s + H_L \tag{5}$$

式中 Q_s ——水与茶树表面的显热交换量,J
 Q_L ——叶片吸收的水凝固潜热,J
 R_n ——叶片通过辐射向外散失的能量,J
 H_s ——叶片通过显热损失的能量,J
 H_L ——叶片通过潜热损失的能量,J
水凝固结冰放出潜热 Q 为

$$Q = dM_{H_2O, s} \tag{6}$$

式中 d ——冰的融化热,J/kg
由此可见,确定茶树表面储水/冰量可为研究防霜能量、实现精准喷灌奠定基础。

2 结果与分析

2.1 茶树储水/冰过程

该茶树植株具有 1204 片叶片,表面积(单面)为 0.682 0 m²。茶树茎杆共被剪切成 448 段,表面积为 0.238 4 m²。表 1 和表 2 中分别为储水量和储冰量结果及田间试验的相关条件。其中,储水量的每个试验重复 2 次,均在试验日的 15:00—18:00 之间进行。储冰量的试验为确保气候环境相似,主要集中在相邻 3 d 的 05:30—08:00 内进行,前 0.5 h 的变化规律可以相互验证。以微量喷头喷灌 1.5 h (2022 年 12 月 29 日),茶树表面储水量和储冰量的动态变化过程如图 4 所示。

当气温在 0℃ 以上时,茶树表面储水量在喷灌初期呈直线上升。因为此时叶片和茎杆表面均为干

表 1 茶树表面最大储水量

Tab.1 Maximum water storage on tea tree surface

喷灌日期	喷灌时段	平均气温/℃	喷灌时长/h	喷头类型	最大储水量/kg	标准差/kg
2022-12-21	15:30—17:00	6.1	1.5	微量喷头	0.217 7	0.008 0
2022-12-29	15:33—17:03	6.9	1.5	微量喷头	0.233 7	
2022-12-23	15:05—15:35	3.5	0.5	微量喷头	0.222 6	
2022-12-27	16:07—16:37	6.0	0.5	微量喷头	0.214 6	0.004 0
2022-12-30	16:00—16:30	5.6	0.5	摇臂喷头	0.190 6	
2022-12-31	17:05—17:35	5.1	0.5	摇臂喷头	0.200 6	
2023-01-03	16:11—17:11	5.2	1.0	微量喷头	0.221 2	0.006 1
2023-01-04	16:21—17:21	6.5	1.0	微量喷头	0.233 6	

表 2 茶树表面储冰量

Tab.2 Ice storage on tea tree surface

喷灌日期	喷灌时段	平均气温/℃	喷灌时长/h	喷头类型	0.5 h 储冰量/kg	最大储冰量/kg
2022-12-29	06:07—07:37	-4.09	1.5	微量喷头	0.986 3	2.429 0
2022-12-30	05:30—06:30	-5.68	1.0	微量喷头	0.956 2	1.817 7
2022-12-31	05:30—06:00	-4.96	0.5	微量喷头	0.939 3	0.939 3
2023-01-03	06:01—06:31	-4.21	0.5	摇臂喷头	0.410 2	0.410 2

注:微量喷头喷灌不同时长的试验中,0.5 h 时储冰量标准差为 0.019 5 kg。

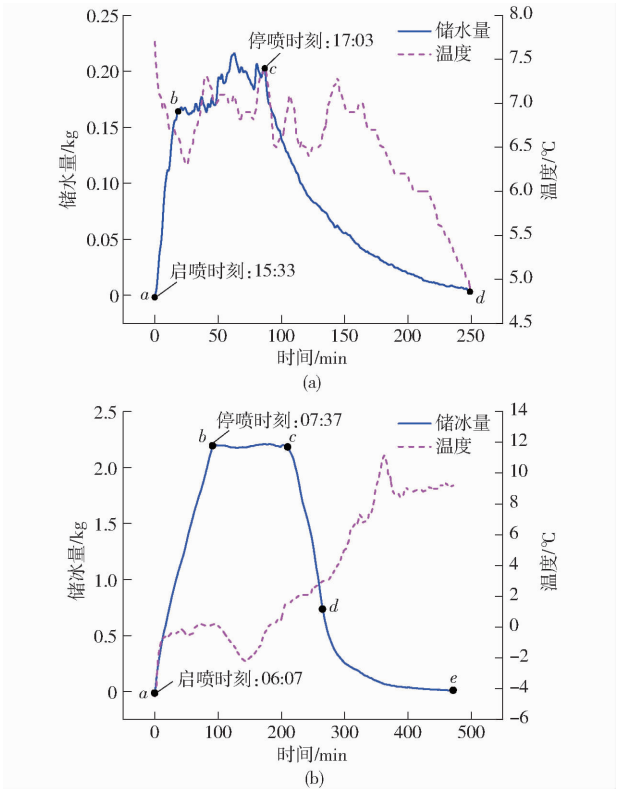


图4 茶树表面储水量、储冰量及温度随时间变化曲线
Fig.4 Variations of water storage, ice storage and temperature on tea tree surface

干燥状态,喷灌水易于粘附而形成薄水膜。但并非所有喷洒到茶树上的水都会附着,一方面水滴撞击在叶片或茎秆上发生飞溅导致部分水分流失;另一方面,水滴的撞击也会使之前积累的水发生滴落。显然,此过程中的输入速率明显高于流失速率,茶树表面储水量迅速增加。此阶段发生在开启喷灌后的一段时间(*ab*段),本文中称为“积累阶段”。

随着喷灌的进行,从图4a中的*bc*段可以看出,茶树上储存的水量仍在增加,但逐渐趋于平衡,本文中称为“动平衡阶段”。此阶段中,茶树表面的储存能力逐渐达到饱和,但在表面张力作用下,喷灌水仍可继续被叶片储存,如图5a所示。叶片的某些特殊的形状,如中间向下凹陷等,也可以进一步增加叶片表面的储水量。文献[28]中将关闭喷灌15.0 min后,不再发生明显滴落行为时的冠层水量作为植物的“最大冠层储存量”。显然,处在“动平衡阶段”的茶树表面的储水量超过其最大冠层储存量,即茶树表面的水量过饱和。此阶段中,输入速率和流失速率相差不大,但较不稳定。喷灌水滴撞击干扰叶片的平衡状态或触发大量的水滴落是造成不稳定的主要原因。

茎秆表面的水主要受重力影响,虽然茎秆上存在一些滴落点会导致少量的水流失(图5b),但大部分超过茎秆表面储存能力的水将汇集到主茎秆并向



图5 茶树叶片和茎秆表面的液体水及冰
Fig.5 Water and ice on surface of leaves and stalks of tea tree

下流动。各次试验中的茎秆水量及其影响规律在后文中讨论。

当喷灌停止后,储水量也立刻降低。这是由于在关闭喷灌的一段时间内,超过储存能力的水并非静止而是仍在发生流动和滴落。静置一段时间后,滴落和茎秆流停止,茶树表面的水以蒸发的形式去除,此过程较为缓慢,在本文中的气候条件下持续时间均在2 h以上,此阶段称为“干燥阶段”。可以观察到该阶段后期的曲线斜率逐渐减小,这是由于叶片上大面积的薄膜蒸发完毕,而滴落点附近水膜较厚,面积较小,导致其后期水分蒸发缓慢。此外,称量结束时茶树植株表面的水量接近于0 g,验证了伞面防滴落和茎秆流收集装置的可靠性。

从图4b中可以看出,当环境温度低至使喷灌水结冰时,茶树表面的冰量在喷灌前期随时间呈正比增加,这与非结冰状态下相同。不同的是环境温度较低,叶片上水膜发生冻结并形成叶片状的薄冰层。温度高于0 °C的喷灌水首先进行显热交换,因此并不会立即完全结冰,水流动至滴落点处时冻结而形成圆锥形的冰柱,见图5c。由于结冰的发生,茶树上水量随着喷灌时间几乎以恒定速率增加,所以仅有“积累阶段”而无“动平衡阶段”。

在茎秆上,冻结的水膜将其包裹并不断增厚,大量的水以冰的形式固定,如图5d所示,其厚度显著高于水膜的厚度。停喷后输入水量为零且茶树植株表面的冰不会流失,因此称图4b中*bc*段为“保持阶段”。当冰层和冰柱逐渐融化,水分主要以滴落和茎秆流的形式流失,流失速率较为迅速,因此*cd*段呈直线下降,将此段称为“融化流失”阶段。当过量的水流失后,剩余的水以蒸发的形式去除,所以*de*段的曲线形状与图4a中的*cd*段相似。不同茶树的*最大储水/冰量*的数值可能存在差异,但整个动态变

化过程及规律应如上所述。本文主要分析喷灌参数的影响,而与茶树有关的相关参数,例如叶面积指数和冠层形状等因素的影响值得进一步研究。

2.2 储水/冰量影响因素

2.2.1 喷头类型

摇臂喷头常用于喷灌防霜^[7],具有覆盖范围大的特点;微量喷头覆盖范围略小,但具有较好的温升效果^[10],同时有助于节约用水^[9]。上述 2 类喷头均可用于茶树的霜冻害防护,因此进一步对比分析两者在储水/冰量上的差异,为茶园防霜喷头的选型提供一定指导。

图 6a 为分别在微量喷头和摇臂喷头喷灌下茶树植株储水量的变化,喷灌时长为 0.5 h。开启喷灌后,微量喷头作用下的储水量始终高于摇臂喷头,同时最大实际储水量也存在明显差异。微量喷头喷灌下该棵茶树最大储水量为 0.22 kg,较使用摇臂喷头时高出 15.8%。图 6b 为冻结条件下,茶树表面在微量喷头和摇臂喷头作用下其表面储冰量的变化。在启喷至停喷的较长时间内,使用微量喷头喷灌下的储冰量不仅较高,且始终是摇臂喷头的 2.0 倍以上。

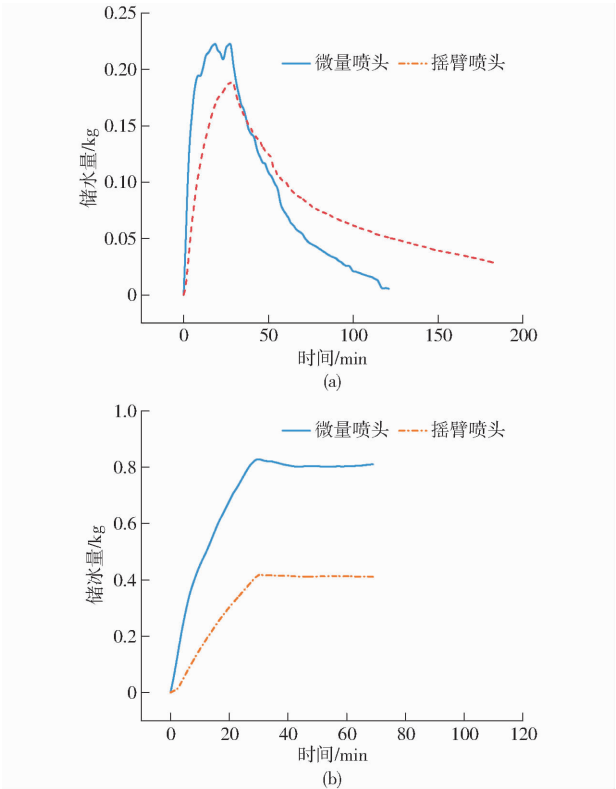


图 6 不同喷头喷灌下茶树表面储水/冰量
Fig. 6 Water and ice storage on surface of tea tree under two different sprinkler nozzles

在本文的喷灌压力下,摇臂喷头在茶树位置处的喷灌强度为 1.2 mm/h,而微量喷头在相同位置处的喷灌强度为 2.8 mm/h。微量喷头喷灌强度较大

是茶树表面储水量较大的主要原因。此外,从摇臂喷头喷出的水滴粒径较大,撞击叶片过程中促进储存水的滴落也是可能的原因。

2.2.2 喷灌时长

由 2.2.1 节可知,微量喷头在冻结条件下可使茶树植株上具有较大的储冰量,因此进一步探究喷灌时长对微量喷头喷灌的影响。图 7a 为茶树植株在不同喷灌时长下的储水量,其变化趋势相似且最大储水量几乎相等,这说明在非冻结条件下,茶树表面储水量均达到饱和。图 7b 为不同喷灌时长下茶树表面储冰量变化。茶树表面冰量增加趋势相同,在停喷前各曲线几乎重合,最大冰量随着喷灌时长的增加而增加。喷灌 1.0 h 的储冰量约 1.81 kg,是喷灌 0.5 h 下储冰量的 2.15 倍;当喷灌时间继续增加至 1.5 h 时,储冰量仍明显增加,为 1.0 h 的 1.33 倍。

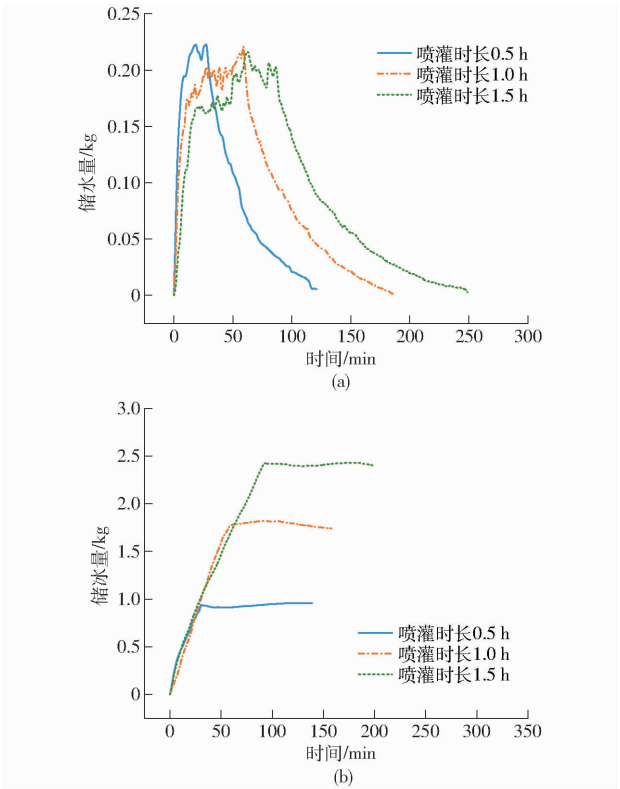


图 7 微量喷头喷灌不同时长对茶树表面储水/冰量的影响曲线
Fig. 7 Effect of different durations of sprinkler irrigation on water storage and ice storage

分析认为造成储冰量增量减少的原因主要有 2 点:田间试验中为保证试验茶树对象一致而分别不同的试验日内进行。虽然 3 个试验日内的天气状况相似,但进行喷灌 1.5 h 的试验时,环境温度较 1.0 h 喷灌试验时略高。另外,观察到叶片上冰层在一定厚度范围内与叶片形状保持一致呈层状,但随着冰层的进一步生长而逐渐呈半球或半椭圆形,液

态水在其上的滞留和凝固量低于冰层较薄的时期。

综上所述,非冻结条件下茶树表面储水量主要与自身储存能力有关,达到饱和后继续增加喷灌时长并无法增加储水量;而冻结条件下,由于低温可以不断地将液态水以冰的形式固定,储冰量随喷灌时长显著增加,但增加量随之具有减小趋势。

2.3 茎杆水量

表 3 为 2 种喷头在非冻结条件下喷灌不同时长后的茎杆水量。微量喷头在冻结条件下喷灌 0.5、1.0、1.5 h 后的茎杆水量分别为 0.109 4、0.325 2、0.436 6 kg;摇臂喷头在冻结条件下喷灌 0.5 h 后的茎杆水量为 0.041 2 kg。

表 3 非冻结条件下茎杆水量

Tab.3 Stem flow mass under non-freezing conditions

喷头类型	喷灌时长/h	茎杆水量/kg	均值/kg	标准差/kg
微量喷头	1.5	0.545 6	0.559 6	0.014 0
		0.573 6		
	1.0	0.408 6	0.410 8	0.002 2
		0.412 9		
	0.5	0.279 4	0.271 5	0.008 0
		0.263 5		
摇臂喷头	0.5	0.092 6	0.095 0	0.002 4
		0.097 3		

注:对微量喷头 3 种喷灌时长处理下茎杆水量方差分析 $P < 0.05$;对喷灌时长为 0.5 h 的 2 种喷头喷灌下茎杆水量 t 检验 $P < 0.05$ 。

由表 3 可知,微量喷头在非冻结条件下,茎杆水量随喷灌时长的增加而增加;非冻结条件下茎杆水量明显高于冻结条件下的茎杆水量。喷灌 0.5 h 时,非冻结条件下茎杆水量为冻结条件下的 2.7 倍。这说明在冻结条件下,喷灌时间较短,茎杆上的水主

要发生冻结行为并留存在茎杆上,使得沿着茎杆流动的水量显著减少。当喷灌时长增加后,非冻结条件下的茎杆水量均匀增加而非成倍增加。茎杆在喷灌时间较短时呈非润湿状态,主要发生沿茎杆向下的流动;而随着喷灌时间增长,茎杆完全润湿后滴落点明显增多,使得更多的水分从茎杆上滴落。在冻结条件下,当喷灌时间增长为 1.0 h 和 1.5 h,茎杆水量分别为 0.5 h 时茎杆水量的 3.0 倍和 4.3 倍。喷灌水在茎杆表面结冰后将其包裹,新输入的喷灌水将作用于新形成的冰柱表面,而在冰柱表面未被冻结的水将再出现类似溪流的流动^[30]。这导致不断有水沿茎杆向下流动,使得茎杆水量增加。

非冻结条件下,微量喷头喷灌 0.5 h 的茎杆水量是摇臂喷头的 3.0 倍;冻结条件下,两者之间的差别略微减小,但前者仍是后者的 2.7 倍,摇臂喷头喷灌强度较小是主要原因。

3 结论

(1)非冻结条件下茶树植株的储水量分别经历积累、动平衡和干燥 3 个阶段;而冻结条件下的储冰量则经历积累、保持、融化流失和干燥 4 个阶段。

(2)非冻结条件下茶树表面的最大储水量与喷灌时长无关;而冻结条件下,茶树表面的最大储冰量随着喷灌时长的递增而显著增加,微量喷头喷灌 1.5 h 的储冰量是 0.5 h 的 2.9 倍。

(3)相同喷灌压力下,微量喷头作用的茶树植株储水量、储冰量均高于摇臂喷头,分别是摇臂喷头的 1.2 倍和 2.0 倍;微量喷头作用的茎杆水量,在非冻结和冻结条件下也较高,分别是摇臂喷头的 3.0 倍和 2.7 倍。

参 考 文 献

[1] 朱永宁,张磊,马国飞,等. 基于危害积温的枸杞花期霜冻指标试验[J]. 农业工程学报,2020,36(14):188-193.
ZHU Yongning, ZHANG Lei, MA Guofei, et al. Frost index of *Lycium Barbarum* during flowering period based on harmful accumulated temperature[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(14): 188-193. (in Chinese)

[2] 邱美娟,刘布春,刘园,等. 中国北方主产地苹果始花期模拟及晚霜冻风险评估[J]. 农业工程学报,2020,36(21):154-163.
QIU Meijuan, LIU Buchun, LIU Yuan, et al. Simulation of first flowering date for apple and risk assessment of late frost in main producing areas of Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(21): 154-163. (in Chinese)

[3] 胡永光,封成岗,汤江文,等. 防霜风机圆弧板叶型降噪结构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):158-168.
HU Yongguang, FENG Chenggang, TANG Jiangwen, et al. Structure design and test on noise reduction for frost protection wind machine of arc-plate blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3):158-168. (in Chinese)

[4] LU Y Z, HU Y G, TIAN J T, et al. Artificial radiation frost chamber for frost formation on tea[J]. Applied Sciences, 2019, 9(22): 4726-4739.

[5] HU Y G, AMOAH A E, LU Y Z, et al. A review of air disturbance technology for plant frost protection[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11: 21-28.

[6] LU Y Z, HU Y G, LI P P. Consistency of electrical and physiological properties of tea leaves on indicating critical cold temperature[J]. Biosystems Engineering, 2017, 159: 89-96.

[7] LU Y Z, HU Y G, ZHAO C, et al. Modification of water application rates and intermittent control for sprinkler frost protection

- [J]. Transactions of the ASABE, 2018, 61(4): 1277–1285.
- [8] HEISEY L W, HEINEMANN P H, MORROW C T, et al. Automation of an intermittent overhead irrigation frost protection[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1994, 10(5): 669–675.
- [9] STOMBAUGH T S, HEINEMANN P H, MORROW C T, et al. Automation of a pulsed irrigation system for frost protection of strawberries[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992, 8(5): 597–602.
- [10] ANCONELLI S, FACINI O, MARLETTO V, et al. Micrometeorological test of microsprinklers for frost protection of fruit orchards in Northern Italy[J]. Physics & Chemistry of the Earth Parts, 2002, 27(23–24): 1103–1107.
- [11] OLSZEWSKI F, JERANYAMA P, KENNEDY C D, et al. Automated cycled sprinkler irrigation for spring frost protection of cranberries[J]. Agricultural Water Management, 2017, 189: 19–26.
- [12] KOC A B, HEINEMANN P H, CRASSWELLER R M, et al. Automated cycled sprinkler irrigation system for frost protection of apple buds[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(3): 231–240.
- [13] HAMER P. An automatic sprinkler system giving variable irrigation rates matched to measured frost protection needs[J]. Agricultural Meteorology, 1980, 21(4): 281–293.
- [14] 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]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 8(1): 98–107.
- [15] 李红, 郭鑫, 陈瑞, 等. 喷灌均匀性和灌水量对冬小麦冠层下水量分配的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(24): 102–111.
LI Hong, GUO Xin, CHEN Rui, et al. Effects of sprinkler uniformity and irrigation volume on the water distribution below the canopy of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(24): 102–111. (in Chinese)
- [16] 王迪, 李久生, 饶敏杰. 基于能量平衡的喷灌作物冠层净截留损失估算[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 27–33.
WANG Di, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of net interception loss by crop canopy under sprinkler irrigation based on energy balance[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 27–33. (in Chinese)
- [17] JIAO J, SU D, HAN L L, et al. A rainfall interception model for alfalfa canopy under simulated sprinkler irrigation[J]. Water, 2016, 8(12): 585–598.
- [18] 郭建平, 栾青, 王婧瑄, 等. 玉米冠层对降水的截留模型构建[J]. 应用气象学报, 2020, 31(4): 397–404.
GUO Jianping, LUAN Qing, WANG Jingxuan, et al. Model construction of rain fall interception by maize canopy[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(4): 397–404. (in Chinese)
- [19] ZHENG J, FAN J, ZHANG F, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2018, 195: 25–36.
- [20] 徐宁, 杨一凡, 林青涛, 等. 大豆冠层对降雨再分配的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 115–119.
XU Ning, YANG Yifan, LIN Qingtao, et al. Effects of soybean canopy on rain fall redistribution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 115–119. (in Chinese)
- [21] 焦健. 喷灌条件下紫花苜蓿冠层水量损失过程及水量分布研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
JIAO Jian. Water losses possesses and water distribution for alfalfa (*Medicago sativa* L.) canopy under sprinkler irrigation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017. (in Chinese)
- [22] WANG X P, ZHANG Y F, HU R, et al. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China[J]. Journal of Hydrology, 2012, 454–455: 152–159.
- [23] KEIM R F, SKAUGSET A E, WEILER M. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity[J]. Advances in Water Resources, 2006, 29(7): 974–986.
- [24] HOLDER C D. Effects of leaf hydrophobicity and water droplet retention on canopy storage capacity[J]. Ecohydrology, 2013, 6(3): 483–490.
- [25] KLAMERUS-IWAN A, WITEK W. Variability in the wettability and water storage capacity of common oak leaves (*Quercus robur* L.) [J]. Water, 2018, 10: 695–704.
- [26] XIAO Q F, MCPHERSON E G. Surface water storage capacity of twenty tree species in Davis, California[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 188–198.
- [27] ANDRÉ F, JONARD M, PONETTE Q. Precipitation water storage capacity in a temperate mixed oak-beech canopy[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(20): 4130–4141.
- [28] 余冬立, 刘营营, 邵明安, 等. 黄土坡面不同植被冠层降雨截留模型模拟效果及适用性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 115–120.
SHE Dongli, LIU Yingying, SHAO Ming'an, et al. Simulated effects and adaptive evaluation of different canopies rainfall interception models in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 115–120. (in Chinese)
- [29] BAPTISTA M D, LIVESLEY S J, PARMEHR E G, et al. Variation in leaf area density drives the rainfall storage capacity of individual urban tree species[J]. Hydrological Processes, 2018, 32(25): 3729–3740.
- [30] LADAN J, MORRIS S W. Experiments on the dynamic wetting of growing icicles[J]. New Journal of Physics, 2021, 23: 123017.