

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.05.027

弥雾灌对枣园冠层环境和光合特性及产量品质的影响

周少梁 孙三民 姚宝林 李发永 何通亮 王伟伟
(塔里木大学水利与建筑工程学院, 阿拉尔 843300)

摘要: 针对高温低湿的极端干旱气候易造成南疆枣树盛花期出现“焦花”及坐果率低、光合速率下降等问题,在枣园冠层布设弥雾系统,在枣树盛花期以弥雾时间和弥雾次数为变量设置3个处理(M1为每天弥雾3次,每次20 min;M2为每天弥雾2次,每次20 min;M3为每天弥雾2次,每次40 min),CK为对照,不弥雾,通过田间试验研究不同处理对枣树落花率、坐果率和光合速率的影响以及红枣产量品质的提升效果。结果表明,相较于对照,弥雾处理能有效增加冠层湿度、降低温度,冠层空气湿度最大可提升158.7%,冠层温度最大可降低38.9%;弥雾处理下的土壤含水率普遍较高,M3处理下土壤含水率最高,相较于CK,土壤含水率提升8.44%;冠层环境的改变会影响枣树的叶片光合速率以及CO₂固定量,弥雾处理下的枣树叶片CO₂固定量均大于对照处理,有利于作物自身发育和促进果实生长;在弥雾期间M1、M2处理的落花率分别比CK低18.39%、15.09%。弥雾处理能调控冠层微环境,可有效提升枣树叶片的光合速率,促进开花坐果,提升红枣品质,每天弥雾3次、每次20 min是获得红枣高产优质的最佳处理。

关键词: 枣园; 弥雾灌; 冠层环境; 光合速率; 落花率; 坐果率

中图分类号: S275.5; S665.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)05-0249-09 OSID: 

Effects of Mist Irrigation on Canopy Environment, Photosynthetic Characteristics, Yield and Quality of Jujube Orchard

ZHOU Shaoliang SUN Sanmin YAO Baolin LI Fayong HE Tongliang WANG Weiwei
(College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Tarim University, Alar 843300, China)

Abstract: In view of the extremely arid climate with high temperature and low humidity, it is easy to cause “burnt flower” and low fruit setting rate and photosynthetic rate decline in jujube trees in Southern Xinjiang. Through field experiments, a set of mist system for jujube orchard canopy was set up with variable mist time and mist times (M1: 3 times a day for 20 min each time; M2: 2 times a day for 20 min each time; M3: 2 times a day for 40 min each time; CK as control, without mist). The effects of different treatments on the flower drop rate and fruit setting rate of jujube trees and the effect of improving the quality of red jujubes were compared, and the best treatment was selected. The result showed that compared with the control, the misting treatment can effectively increase the canopy humidity and lower the temperature, it can increase the air humidity by up to 158.7%, and reduce the temperature by up to 38.9%. The soil moisture content under the misting treatment was generally higher, the soil moisture content of M3 was the highest. Compared with CK, the soil moisture content was increased by 8.44%. Changes in the canopy environment would affect the photosynthetic rate of the jujube leaves and the fixed amount of CO₂, the fixed amount of CO₂ on the leaves of the jujube under the mist treatment was greater than that of the without mist treatment. Therefore, the accumulation of crop organic matter and the storage of its own energy after the mist was better, which was more conducive to the growth of the crop and the growth of fruits. Through mist, a suitable environment can be created for jujube trees, which had significant effects in reducing flower drop rate, increasing fruit setting rate and fruit quality. The flower

drop rate of M1 and M2 treatments was 18.39% and 15.09% lower than that of CK. Mist treatment can indeed regulate the canopy environment, a suitable canopy environment can increase the photosynthetic rate of jujube leaves, promote flowering and fruit setting, and improve the quality of red jujubes. Through this experiment, it was found that three times of mist a day, 20 min each time, was the best treatment to obtain high-yield and high-quality red dates.

Key words: jujube orchard; mist irrigation; canopy environment; photosynthetic rate; flower drop rate; fruit setting rate

0 引言

新疆环塔里木盆地光热资源十分丰富,其气候条件适宜种植红枣,因此红枣成为该地区大力发展的特色林果之一^[1]。红枣是目前新疆地区发展最快的特色林果,种植枣树不仅能起到防风固沙的作用,而且为农民致富提供了新途径^[2]。

南疆属于极端干旱地区,在枣树生育期,空气温度高,且湿度低。红枣的花期长、花量大,落花落果严重,自然坐果率低,一般为1%左右^[3-4]。红枣花期需要适宜的冠层温湿度,高温、干旱的天气影响花粉发芽和花粉管生长,导致不易授粉,出现“焦花”现象,不利于传粉受精,导致大量落花、落果^[5-7]。研究表明,枣树开花受温度、湿度、降水、光照、大风等气象因素的直接影响,这些因素同时满足才能开花,空气过于干燥,导致开花快、花期短、坐果率低,花期空气相对湿度决定坐果率,并影响果实品质^[8]。因此,干旱条件下枣园开花期的冠层微气候严重影响枣树的开花、坐果及后期产量和品质。

微环境调控技术是利用某种设施或方法对作物生长环境(光照强度、温度、湿度、CO₂浓度等)进行调控,为作物生长提供适宜的生长环境,从而获得高

产量、高品质和经济效益的一种高效农业栽培技术,该技术多用于设施农业^[9-10]。樊丁宇等^[11]通过间作模式改变枣园环境,提高了骏枣坐果率。洪明等^[12]在枣树花期通过布设一套微喷灌溉系统来增加空气湿度、降低温度,对提高红枣坐果率和品质效果显著。申晓晶等^[13]研究发现,冠层相对湿度是影响枣树光合作用的主要因素。目前,关于适宜新疆枣园的空气温湿度、精确的调控方法,以及不同调控方式对冠层空气温湿度、光合速率、红枣产量及品质的影响等相关研究较少。本研究通过在枣园布设弥雾系统来调控冠层空气温湿度,分析不同冠层环境对枣树生长及产量、品质的影响,为南疆红枣优质高产提供理论支持。

1 试验区概况与研究方法

1.1 试验区概况

试验于2018年4—11月在位于新疆维吾尔自治区阿拉尔市塔里木大学水利与建筑工程学院灌溉试验站(80°30'N,40°22'E)进行。试验枣园的地下水埋深2 m左右,其土壤理化性状如表1所示。红枣种植品种为当地普遍栽培的骏枣,树龄9年,种植方式为矮化密植。

表 1 试验小区土壤理化性状
Tab.1 Soil physical and chemical properties of experimental field

土层深度/ cm	土壤质地	田间持水量/ (g·g ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	pH 值	全氮质量比/ (g·kg ⁻¹)	速效磷质量比/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量比/ (mg·kg ⁻¹)
0~10	砂壤土	19.43	1.38	8.18	1.25	51.21	451.57
10~20	砂壤土	19.18	1.38	8.19	1.24	45.26	467.51
20~30	砂壤土	19.22	1.40	8.25	1.31	44.17	435.67
30~40	黏土夹层	26.43	1.43	8.43	1.34	41.29	421.85
40~50	砂土	24.15	1.42	8.24	1.20	41.35	412.67

1.2 试验设计

选取呈直线排列、株距为1 m的6棵枣树划分为一个试验小区,设定4个小区,所选的枣树树冠大小相近,形状相似。在枣树的全生育期采用间接地下滴灌的灌水方式,每株每次灌水18 L,根据枣树各个生育期的需水特性确定灌水间隔,见表2。其中3个小区在7月上旬到7月下旬枣树盛花期、坐果

期间实施空中弥雾灌,3个试验小区即为3个处理,1个小区不进行弥雾灌,设为对照处理,每个处理3个重复,每个处理除了弥雾灌时间和时长不同,其他田间管理,包括修剪、施肥等均相同。在枣树行间布置高度为180 cm的弥雾装置,弥雾喷洒直径200 cm。用塑料薄膜将试验小区围起来,防止弥雾后制造的低温高湿环境受到外界环境的影响,从7月2—30

日期间开启空中弥雾灌,具体方案见表 3。

表 2 灌水时间
Tab.2 Irrigation schedule

物候期	灌水日期
萌芽展叶期	5 月 10 日、6 月 5 日
开花坐果期	6 月 20 日、7 月 1 日、7 月 9 日、7 月 17 日
果实膨大期	7 月 25 日、8 月 3 日、8 月 12 日、8 月 20 日、8 月 28 日
果实成熟期	9 月 10 日、9 月 30 日

表 3 弥雾灌试验处理方案

Tab.3 Design plan for experimental of mist irrigation

处理	弥雾时间
M1	11:30—11:50、15:30—15:50、19:30—19:50
M2	11:30—11:50、15:30—15:50
M3	11:30—12:10、15:30—16:10
CK	不做弥雾处理

1.3 试验装置及参数测定方法

弥雾系统所采用的喷头为全铜可调高雾化喷头,出水孔直径为 0.9 mm,试验区水头压力为 150 kPa,实际测得喷头流速为 29.79 L/h。在枣园中 40 cm 高处安置空气温湿度二合一传感器,监测弥雾条件下的空气温湿度变化情况,传感器于 5 月开始进行数据监测直至 10 月红枣成熟,全天 24 h 工作,每隔 0.5 h 记录 1 次数据;在距离树干 5 cm、距地表 20 cm 深处安置中科正奇公司的土壤湿度传感器,监测 6、7、8 月灌水前后的土壤水分变化状况,全天 24 h 工作,每隔 0.5 h 记录 1 次数据;从枣树开始开花起,在前期每隔 3 d 观测记录 1 次枣树落花数量,后期随着落花数的减少适当延长时间间隔,观察落花的变化,最后求得枣树总花数量,用每阶段的落花数除以总花数,得到不同时期的落花率;每 20 d 进行一次枣树的光合作用测定,选择一个晴天,用 LI-6400XT 型便携式光合作用测量仪测量枣树的光合作用,每棵树选择 4 片叶子,东、南、西、北各 1 片,每隔 2 h 测 1 次,保证一天内测的是同一片叶子。

在果实成熟后进行红枣品质检测,包括单果质量、果径、产量、总糖含量、可滴定酸含量、维生素 C 含量等。

表 4 冠层湿度相较于对照的日增加幅度

Tab.4 Daily increase in canopy humidity compared with CK treatment %

处理	空气湿度增加率						
	7 月 12 日	7 月 13 日	7 月 14 日	7 月 15 日	7 月 16 日	7 月 17 日	7 月 18 日
M1	0.5 ~ 64.3	1.5 ~ 75.1	2.3 ~ 48.7	2.6 ~ 47.1	6.6 ~ 69.6	3.2 ~ 42.6	10.3 ~ 77.2
M2	1.8 ~ 69.6	7.9 ~ 60.1	2.7 ~ 44.3	3.7 ~ 41.2	7.3 ~ 19.6	4.6 ~ 38.7	6.1 ~ 76.3
M3	4.0 ~ 101.2	4.7 ~ 141.1	5.2 ~ 67.5	9.3 ~ 70.0	9.5 ~ 157.8	1.0 ~ 61.1	9.4 ~ 158.7

2 结果与分析

2.1 冠层湿度变化

弥雾期间枣园冠层空气湿度日变化如图 1 所示,此处仅以 7 月 11 日的数据为例进行分析。从图中可以看出,各个处理下空气湿度在 02:00 左右达到最大后开始降低,直至 11:30 开始弥雾时,弥雾处理下空气湿度变化与 CK 之间开始出现差异,CK 空气湿度持续下降,于 17:30 左右湿度最低,为 18.9%,后开始逐渐升高。M1、M2 处理下,11:30 进行 20 min 的弥雾可提升一定的空气湿度,与 CK 的差异不大,但可以使第 2 次弥雾之前这段时间冠层湿度下降速度变慢;M1 处理较 M2 处理在 19:30—19:50 多进行了一次弥雾,但两个处理对空气湿度影响差异不大,从全天看来,这两种处理对增加空气湿度有一定帮助;M3 处理增加了弥雾时长,比 M2 处理每次多弥雾 20 min,由图中可看出在早上进行 40 min 的弥雾后,空气湿度有一个较为明显的上升过程,15:30 进行 40 min 的弥雾空气湿度的增加更加明显,所以在早上和中午各弥雾 40 min 的增湿效果显著高于 20 min 弥雾。17:30 左右,枣林间的空气湿度开始上升,因此在 19:30 进行 20 min 弥雾后发现,空气湿度上升速率有一定的增加,但效果并不显著,到 22:00 左右,各处理下空气湿度趋于一致,持续上升到第 2 天 02:00。

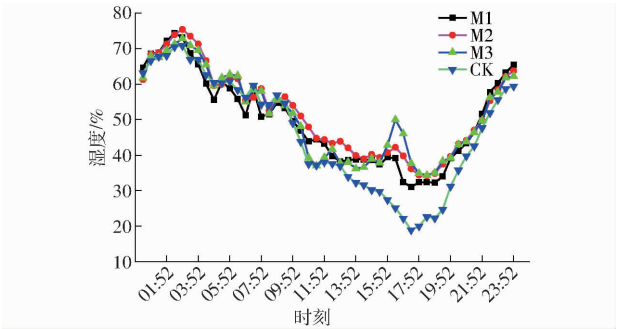


图 1 不同处理冠层空气湿度日变化曲线
Fig.1 Daily variation curves of canopy humidity under different treatments

在弥雾期间选取 7 月 12—18 日的 7 d 时间,在相同时刻比较各处理在 1 d 内相较于 CK 的湿度增加幅度,其变化幅度如表 4 所示,弥雾时间段内对照处理的日冠层湿度变化范围如表 5 所示。

表 5 对照处理的日冠层湿度变化范围

Tab.5 Daily variation range of canopy humidity in CK treatment

日期	7 月 12 日	7 月 13 日	7 月 14 日	7 月 15 日	7 月 16 日	7 月 17 日	7 月 18 日
湿度/%	22.5 ~ 61.7	16.4 ~ 59.3	20.3 ~ 50.5	18.2 ~ 56.9	16.9 ~ 45.8	25.9 ~ 58.0	19.3 ~ 56.4

从表 4 可以看出,M1、M2 的湿度增加幅度比较接近,说明弥雾次数对湿度增长影响较小;M3 的湿度增加幅度较大,进一步说明了弥雾时间是影响空气湿度的重要因素。

2.2 冠层温度变化

弥雾期间空气温度日变化如图 2 所示,此处仅以 7 月 11 日的数据为例进行分析。从图中可以看出,各处理均在 02:00 左右温度最低,而后开始出现波动式的缓慢增长,09:30 开始,温度的增加速度变快,直至 11:30 开始弥雾时,不同处理之间的冠层温度变化出现差异,CK 温度继续快速上升,到 17:30 左右,温度达到最大值(41.5℃),而后开始降低。M1 与 M2 每次弥雾 20 min,上午处于温度上升阶段,进行 20 min 的弥雾有减缓空气温度提升速度的作用,并不能使空气温度下降,M1 在 19:30 比 M2 多喷水一次,这次弥雾 20 min 对空气温度影响很小,两个处理的日温度变化基本接近。M3 每次的弥雾时间为 40 min,由图中可以看出,第 1 次弥雾对空

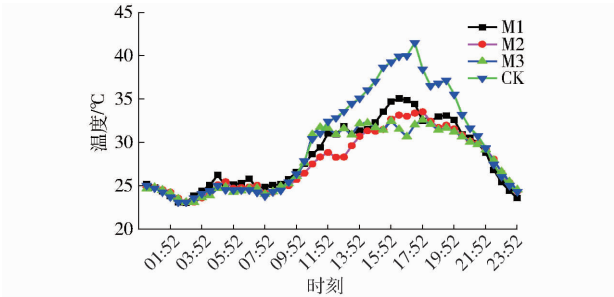


图 2 不同处理冠层温度日变化曲线

Fig.2 Daily variation curves of canopy temperature under different treatments

气温度影响很小,与 M1、M2 接近,延缓温度的升高,而 15:30 进行 40 min 的弥雾时空气温度出现了一个明显的下降。到 21:30 时,不同处理下的空气温度基本一致,一直下降至第 2 天 02:00,温度最低。

同样在弥雾期间选取 7 月 12—18 日,比较各处理在 1 d 内的相同时刻,相较于 CK 的温度降低幅度,其变化如表 6 所示,弥雾时间段内对照处理的日冠层温度变化范围如表 7 所示。

表 6 冠层温度相较于对照的日降低幅度

Tab.6 Daily decrease in canopy temperature compared with CK treatment

%

处理	冠层温度降低率						
	7 月 12 日	7 月 13 日	7 月 14 日	7 月 15 日	7 月 16 日	7 月 17 日	7 月 18 日
M1	3.0 ~ 16.3	3.1 ~ 21.67	3.8 ~ 20.3	1.0 ~ 19.6	3.6 ~ 16.8	5.3 ~ 27.8	1.6 ~ 17.5
M2	3.7 ~ 19.0	2.8 ~ 21.98	2.6 ~ 15.1	0.9 ~ 22.1	2.3 ~ 18.3	4.3 ~ 24.8	0.8 ~ 16.1
M3	3.1 ~ 27.0	9.1 ~ 33.5	7.4 ~ 24.7	8.1 ~ 22.7	3.8 ~ 38.9	2.5 ~ 33.9	4.2 ~ 28.7

表 7 对照处理的日冠层温度变化范围

Tab.7 Daily variation range of canopy temperature in CK treatment

日期	7 月 12 日	7 月 13 日	7 月 14 日	7 月 15 日	7 月 16 日	7 月 17 日	7 月 18 日
温度/℃	27.5 ~ 43.0	28.5 ~ 50.6	31.0 ~ 46.7	29.8 ~ 52.1	29.4 ~ 52.8	25.3 ~ 42.2	28.3 ~ 46.8

从表 6 可以看出,M1、M2 的温度降低幅度比较接近,说明弥雾次数对温度降低幅度影响较小;M3 的温度降低幅度较大,进一步说明了弥雾时间是影响空气温度的重要因素。

2.3 土壤含水率变化

枣园弥雾影响着冠层温湿度,抑制了土壤蒸发,进而影响着土壤含水率,此外,弥雾过程中落在地表的水也会对土壤含水率产生影响。图 3 为 7 月 11 日、7 月 19 日、7 月 28 日灌水结束 24 h 后,距离枣树主干 5 cm、地表下 20 cm 深处的土壤含水率,由图可以看出,弥雾处理下的 20 cm 深处的土壤含水率普遍高于 CK,弥雾处理之间比较发现 M1、M2 的土壤

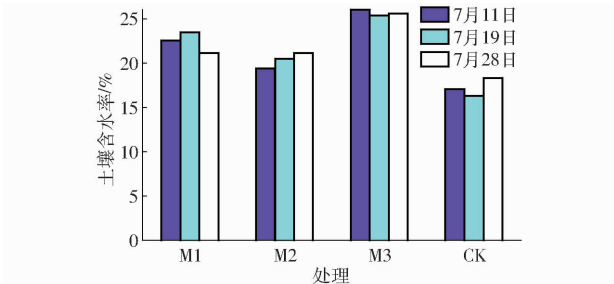


图 3 不同处理在地表下 20 cm 处土壤含水率

Fig.3 Diagram of soil water content at depth of 20 cm under different treatments

含水率较为接近,明显低于 M3,整体呈现出弥雾总时间越长,土壤含水率越大的趋势。M3 的土壤含水

率最高,相较于 CK,土壤含水率大约提升 8.44%。

2.4 叶片光合速率日变化

温度影响着植物光合作用酶的活性以及叶片气孔的张开闭合,过低或过高的空气温度都不利于光合作用的进行。

图 4(图中 m1、m2、m3 对应为 M1、M2、M3 弥雾处理前的试验处理号)为枣林间未进行弥雾时,各处理下的叶片光合速率日变化,通过比较未弥雾时枣树的日光合速率变化曲线可以发现,不同处理下的枣树日光合速率以及变化趋势基本相同,日光合速率变化为一个单峰曲线,从 10:30 开始上升,到 12:30 光合速率达到最大后持续下降。且在相同时刻下不同枣树的光合速率接近,说明树体之间的差异较小。

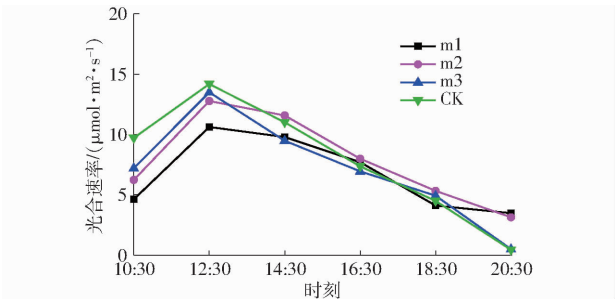


图 4 未弥雾处理下光合速率日变化曲线
Fig. 4 Daily variation curves of photosynthetic rate under without mist treatment

以时间为自变量,以单位叶面积光合速率为因变量,以一元四次多项式为模型,将各处理下的光合速率日变化曲线拟合出一元四次方程^[14],该曲线方程是下文推导枣树叶片日 CO₂ 固定曲线的基础,一元四次方程分别为

$$y_1 = -0.0014t^4 + 0.0843t^3 - 1.2093t^2 + 4.9646t + 4.6618 \quad (R^2 = 0.9907, m1)$$
$$y_2 = -0.0075t^4 + 0.2096t^3 - 2.0306t^2 + 6.5701t + 6.2228 \quad (R^2 = 0.9998, m2)$$
$$y_3 = -0.0191t^4 + 0.4251t^3 - 3.1891t^2 + 7.8434t + 7.2471 \quad (R^2 = 0.9952, m3)$$
$$y_4 = -0.0119t^4 + 0.2792t^3 - 2.2688t^2 + 5.7167t + 9.7153 \quad (R^2 = 0.9998, CK)$$

式中 t ——从 10:30 开始的时长

$y_1、y_2、y_3、y_4$ ——某一时刻的单位叶面积光合速率

式中 R^2 均大于 0.99,说明方程的拟合度较好。

为了探讨不同处理下叶片在 1 d 内固定的 CO₂ 总量,用光合叶面积乘以光合速率变化量,即可得到 CO₂ 固定曲线,对该一元四次方程求积分后,可得到单位面积的日固定 CO₂ 总量 P 。数学式^[15]为

$$P = \int Sy(t) dt = S \int y(t) dt \quad (1)$$

式中 S ——单位叶面积

$y(t)$ ——光合速率变化量

其中 $Sy(t)$ 为 CO₂ 固定曲线, $Sy(t) dt$ 为日某一时刻单位叶面积的 CO₂ 固定量。

通过式(1)即可得到日 CO₂ 固定量,未弥雾处理下的叶片日 CO₂ 固定量如表 8 所示。

表 8 未弥雾处理下的叶片日 CO₂ 固定量
Tab. 8 Daily fixed amount of CO₂ in leaves without mist treatment

处理	$P/\mu\text{mol}$	CO ₂ 质量/g
m1	268 192	11.79
m2	316 317	13.92
m3	296 485	13.04
CK	312 195	13.73

表 8 中均是由单位叶面积(1 m²)所求得的 CO₂ 固定量。其中 m1 处理下的 CO₂ 固定量最小,比 CK 小了 14.13%,但总体来说各处理在未弥雾时,彼此之间的光合速率差异较小且 CO₂ 固定量比较接近。

图 5 为弥雾处理时枣树叶片光合速率日变化曲线。弥雾处理后相比较于 CK 的枣树叶片光合速率的峰值更高,且向后推迟 2 h。从图中可以看出,CK 依然是一个单峰曲线,于 12:30 光合速率达到最大值,而后出现持续降低,弥雾条件下 3 个处理光合速率峰值出现在 14:30,且都比 CK 的峰值大,M3 叶片光合速率最强,M3 在 16:30 时的光合速率依然很高,所以弥雾处理 60 min,其对环境改变所保持的时间更长。

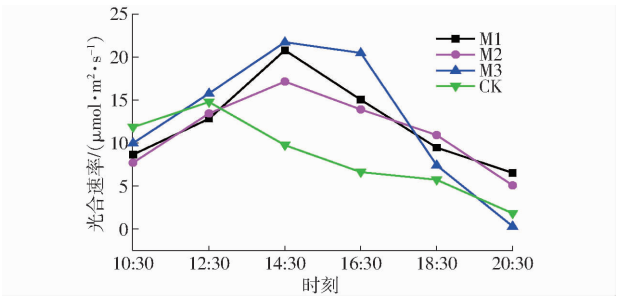


图 5 不同弥雾处理后光合速率日变化曲线
Fig. 5 Daily variation curves of photosynthetic rate after different mist treatments

以时间为自变量,以单位叶面积光合速率为因变量,以一元四次多项式为模型,将各弥雾处理下的光合速率日变化曲线拟合出一元四次方程,分别为

$$Y_1 = 0.0259t^4 - 0.4771t^3 + 2.1637t^2 - 0.0366t + 8.4301 \quad (R^2 = 0.9456, M1)$$
$$Y_2 = 0.0023t^4 - 0.0269t^3 - 0.3893t^2 + 3.9907t + 7.5653 \quad (R^2 = 0.9795, M2)$$
$$Y_3 = 0.0327t^4 - 0.6359t^3 + 3.1259t^2 - 1.3182t + 10.006 \quad (R^2 = 0.9955, M3)$$

$$Y_4 = -0.0196t^4 + 0.4215t^3 - 2.9306t^2 + 5.743t + 11.802 \quad (R^2 = 0.9995, CK)$$

式中 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 ——不同弥雾处理某一时刻的单位叶面积光合速率

通过式(1)计算即可得到 CO_2 固定量,表 9 为弥雾处理后叶片日 CO_2 固定量。

表 9 不同弥雾处理下叶片日 CO_2 固定量

Tab.9 Daily fixed amount of CO_2 in leaves under different mist treatments

处理	$P/\mu\text{mol}$	CO_2 质量/g
M1	464 220	20. 43
M2	447 012	19. 67
M3	505 332	22. 23
CK	324 190	14. 26

表 9 中均是由单位叶面积(1 m^2)所求得的 CO_2 固定量。弥雾处理下的 CO_2 固定量普遍大于 CK,其中 M3 处理下 CO_2 固定量最大,比 CK 高 55.89%。总体来说,弥雾处理的枣树叶片光合速率相较于 CK 有显著提升,弥雾处理间的 CO_2 固定量比较接近,且显著高于 CK,说明弥雾能提高枣树的光合速率。再结合表 8 和表 9 来看,弥雾前后 CK 的 CO_2 固定量变化量较小,而 M1、M2、M3 与 m1、m2、m3 之间比较发现,弥雾后叶片 CO_2 固定量明显增大,进一步说明了弥雾有利于叶片光合作用的进行。

综合比较弥雾前后光合速率变化发现,弥雾后,叶片光合速率明显提升,各处理下的 CO_2 固定质量也明显高于 CK, CO_2 固定量直接反映了作物有机物的积累以及自身能量的储存状况,因此弥雾后更有利于作物自身发育和促进果实生长。

2.5 枣树落花率、坐果率变化

枣树落花率如图 6 所示,由图中可以看出,在未弥雾之前,不同处理之间的枣树落花率变化无明显规律,除 M2 在 6 月 18 日落花率剧烈增加之外,其余时间各处理之间无明显差异。自 7 月 1 日开始弥雾处理后,弥雾处理的枣树落花率低于不处理的枣树落花率,在 7 月 4 日,CK 落花率明显大于其他处理,在 7 月 19 日,CK 的落花率也处在一个较高水平,说明冠层环境的改变可以延长花期,更加有利于坐果。M1 显示了最好的保花效果。

不同处理在弥雾期间所测得的 4 次落花率变化如表 10 所示,从表中可以看出,M1、M2 处理在弥雾期间落花率明显比 CK 低,M1 比 CK 相对降低了 18.39%,M2 比 CK 相对降低了 15.09%,而 M3 的落花率高于 CK,说明每次弥雾 20 min 有利于防止“焦花”造成落花,弥雾时间为 40 min 时,反而不利于枣花的保持。

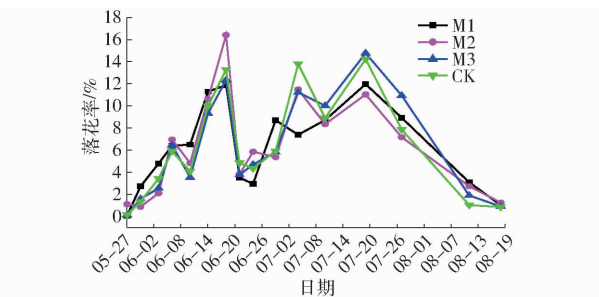


图 6 生育期内枣树落花率的变化曲线

Fig.6 Variation curves of flower drop rate of jujube trees in growth period

表 10 不同处理下弥雾期间的落花率

Tab.10 Flower drop rate during mist under different treatments %

日期	M1	M2	M3	CK
7 月 4 日	7. 39	11. 48	11. 22	13. 80
7 月 10 日	8. 27	8. 35	10. 02	8. 91
7 月 19 日	11. 97	11. 04	14. 77	14. 23
7 月 27 日	8. 93	7. 17	10. 94	7. 86
总计	36. 56	38. 04	46. 95	44. 80

不同处理下的枣树坐果率如图 7(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))所示,坐果率为枣树结果数量占总的开花数量百分比,从图中可以看出 M1 和 M2 的坐果率比较接近,M3 和 CK 的坐果率比较接近,M1、M2 的坐果率明显大于 M3、CK,差异显著。因此可以得出,单次弥雾 20 min 可大大提高坐果率,弥雾 3 次和 2 次对其影响比较小。当弥雾时间为 40 min 时,其坐果率接近 CK,故该处理对提高枣树坐果基本没有影响,落花率较小的处理其坐果率相应比较高。

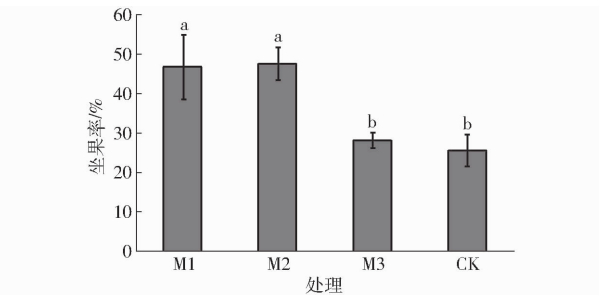


图 7 不同处理的枣树坐果率

Fig.7 Fruit setting rate of jujube under different treatments

2.6 灌水量与红枣产量

不同处理下枣树果实的单果质量、产量及灌水量如表 11 所示。9 月摘下鲜红枣后称量,根据单棵树产量和种植密度推测产量。从表中可以看出弥雾处理下灌水量均高于对照灌水量;在单果质量中,M1、M2、M3 显著提高,与 CK 存在显著差异,但在产量上,M3 比 CK 低且差异显著,可能是弥雾时间过长能促进果实增大,但增加了落花率和落果率,导致

最后产量降低。M1、M2 的产量显著高于 M3、CK，说明每次弥雾 20 min 对于促进果实增大、降低落花落果有一定帮助。综合灌水量和产量分析发现，M2 每天需进行 2 次弥雾，只比 CK 灌水量多 705.45 m³/hm²，但获得了最大产量和单果质量，而 M1 和 M3 处理灌水量比 M2 大，产量反而有所降低且单果质量较小，说明适量灌溉对冠层温湿度的改变有助于促进枣树生长，提升产量，过量灌溉调控下的冠层环境对枣树生长不利，产量降低，因此，M2 是提高产量的最佳灌溉方式。

表 11 不同处理下的红枣单果质量、产量和灌水量

Tab.11 Single fruit weight and yield of red dates and irrigation amount under different treatments

处理	单果质量/g	产量/(kg·hm ⁻²)	灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)
M1	22.12 ^a	9 788.55 ^a	3 087.60
M2	24.17 ^a	10 104.60 ^a	2 584.95
M3	22.17 ^a	7 309.17 ^c	3 590.40
CK	18.98 ^b	8 349.30 ^b	1 879.50

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)，下同。

2.7 果实品质分析

表 12 为不同处理下的红枣果实品质，从表中可以看出，M2 处理纵径最大，其余 3 个处理下果实纵径相近，与 M2 处理达到显著性差异水平。M2 处理横径最大，CK 处理横径最小，两者之间具有显著性差异，而与 M1、M3 无显著差异。总体看来，弥雾处理可以提高红枣纵横径，M2 处理果实纵径提升最明显，是促进果实变大的最佳处理。

表 12 不同处理下的果实品质

Tab.12 Fruit quality under different treatments

处理	果实横径/mm	果实纵径/mm	维生素 C 含量/(mg·(100 g) ⁻¹)	可溶性糖含量/%	还原糖含量/%	可滴定酸含量/%
M1	30.45 ^{ab}	43.13 ^b	979.76 ^a	37.54 ^a	8.79 ^b	0.80 ^a
M2	31.48 ^a	46.71 ^a	927.57 ^{bc}	29.53 ^b	9.60 ^b	0.66 ^b
M3	31.02 ^{ab}	43.54 ^b	965.28 ^{ab}	25.52 ^b	16.02 ^a	0.67 ^b
CK	29.46 ^b	43.10 ^b	894.32 ^c	30.79 ^b	5.86 ^c	0.79 ^a

从表 12 可以看出，试验各弥雾处理红枣的维生素 C 含量均高于 CK，其中 M1 和 M3 的红枣维生素 C 含量比较接近，显著高于 CK，M2 的维生素 C 含量略高于 CK，无显著性差异，说明弥雾有增加果实维生素 C 含量的效果，且随着弥雾时间和弥雾次数的增加，都会促进果实维生素 C 含量增加。其中 M1 的可溶性糖含量最高，与其他处理之间达到显著差异水平(P<0.05)，可溶性糖是影响果实甜度的重要因素，因此 M1 果实最甜。而 M2、M3 处理的可溶性糖含量低于 CK，但彼此之间无显著差异，说明弥

雾次数过少或者弥雾时间过长反而有可能使果实中的可溶性糖含量降低。M3 还原糖含量最高，与其他处理达到显著差异水平(P<0.05)，M1、M2 还原糖含量也显著高于 CK，可见弥雾处理对提升果实还原糖含量效果明显，不同弥雾次数之间对还原糖影响较小，弥雾时间越长，对还原糖含量的增加越好。M2 可滴定酸含量最低，与 M3 处理的结果相近，M1 和 CK 结果相近，M2、M3 显著低于 M1、CK，说明在早上和中午进行两次弥雾可以降低果实中的可滴定酸含量，而弥雾时长对其影响比较小。

3 讨论

枣树开花坐果的最适宜温度为 24~30℃，最适宜湿度为 70%~80%^[5]，试验发现，不弥雾条件下会在 13:00—20:30 出现高温低湿的情况，不利于枣树的开花坐果，在 17:30 左右出现冠层温度最高，空气相对湿度最低。在枣林间进行弥雾，是增加空气湿度降低空气温度的有效方式，对比发现早中晚 3 次弥雾和早上中午 2 次弥雾对于冠层环境的影响接近，弥雾时间越长增湿降温效果越好。各处理起到的温湿度调控作用有限，虽然缓解了冠层环境问题，但并没有达到最适宜的枣树生长环境，因此还需进一步探索。洪明等^[12]选择在枣树盛花期每天 19:30 喷水 1 次，每次喷水的时间不同来改变冠层环境，试验发现弥雾处理的气温较 CK 低 0.4%~3.8%，空气湿度较 CK 高 -0.1%~5.3%。这与本试验结果略有差异，本试验研究发现在 19:30 进行弥雾对空气的温湿度影响较小，11:30—20:30，弥雾处理下冠层湿度比对照高 1.0%~158.7%，空气温度较对照低 2.5%~38.9%。这可能是弥雾次数、弥雾时间以及弥雾时刻不同所引起的差异，此外空气温湿度传感器的布设高度不同，地表蒸发以及温度散失也会对监测结果产生不同的影响。

已有研究表明调节空气湿度可以提高植物的光合作用速率^[16-17]。本研究发现，通过枣树间弥雾会促进叶片的光合速率，未处理的叶片净光合速率日变化呈单峰曲线，这与前人研究结果不一致。SU 等^[18]试验发现，净光合速率日变化呈双峰型，这可能是不同试验地区的气候条件不同，以及红枣种类差异导致光合速率变化趋势不同。在本试验中对比 M1、M2 发现，弥雾次数对光合速率的影响不大；对比 M2、M3 得出结论，弥雾时间与光合速率之间有直接关系，M3 处理下增湿降温效果更好，更有利于植物在中午时进行光合作用，故弥雾时间长光合速率高，但该结论是由两个处理对比得出，后续还需增加处理，详细分析弥雾时间对空气温湿度的影响而引

起叶片光合速率改变的根本规律。

目前,通过调控空气温度和湿度,促进作物优质高产的应用较为广泛,文献[19-20]发现,降低葡萄树冠层空气温度、湿度,可以提升葡萄的品质。本试验通过弥雾发现不同的空气温湿度对改善红枣品质有一定的帮助,仅仅通过3种不同的弥雾方式来调控冠层温湿度,各处理之间红枣品质的差距不够显著,而如何精确地调控空气温湿度,探求最优的调控方式,改进红枣品质,以适用红枣在加工、食用等不同方面的需求,还需进一步研究。

4 结论

(1)在枣园中进行弥雾处理可以增加空气湿度、降低空气温度,与CK相比19:30弥雾20 min影响较小,弥雾时间越长,对空气温湿度的改变越大,与弥雾20 min相比,弥雾40 min在中午的增湿降温效果十分显著。M3处理的环境调控能力最强,相较于CK,在同一天内,枣园空气温度最少降低2.5%、

最多降低38.9%,空气湿度最少增加1.0%、最多增加158.7%。

(2)枣园弥雾影响冠层温湿度,抑制了土壤蒸发,进而影响土壤含水率,M3处理的土壤含水率最高,相较于CK,土壤含水率提升8.44%。

(3)空气温湿度的改变影响叶片光合作用的进行,适宜的温度促进叶片的光合作用,有助于枣树生长,在11:30和15:30弥雾40 min,枣树叶片的光合速率最高,CO₂固定量最大,其CO₂固定量比CK高55.89%。

(4)在枣树盛花期每天弥雾2次或3次,每次弥雾20 min,是防止焦花落花的最佳处理,在弥雾期间M1、M2处理的落花率分别比CK低18.39%、15.09%。

(5)弥雾处理有利于提升红枣品质,弥雾处理红枣的纵横径、单果质量、维生素C含量等指标均有所提高。每天3次、每次弥雾20 min处理下红枣糖酸含量最高,且其他品质指标也处在较高水平,所以该处理为最佳处理。

参 考 文 献

- [1] 洪明,赵经华,靳开颜,等. 环塔里木盆地红枣灌溉现状调查研究[J]. 节水灌溉, 2013(2):66-70.
HONG Ming, ZHAO Jinghua, JIN Kaiyan, et al. Investigation of red jujube trees irrigation status in Tarim Basin[J]. Water Saving Irrigation, 2013(2):66-70. (in Chinese)
- [2] 王亮. 新疆红枣资源的开发[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(7):5.
- [3] 胡安鸿,王晓辉,阿依努尔·艾海提. 阿克苏红枣花果期管理关键技术[J]. 新疆农业科技, 2018(3):20-22.
- [4] 宋彬,王富荣,沈鉴宇. 枣树落花落果主要改良措施比较分析[J]. 北方园艺, 2015(3):165-168.
SONG Bin, WANG Furong, SHEN Jianyu. Comparison and analysis of the main improvement measures for flower and young fruit drop of *Ziziphus jujuba* Mill. [J]. Northern Horticulture, 2015(3):165-168. (in Chinese)
- [5] 张鹏飞,刘亚令,聂磊云,等. 枣树花及果实的缺点分析[J]. 北方园艺, 2011(21):171-173.
ZHANG Pengfei, LIU Yaling, NIE Leiyun, et al. The analysis of the disadvantages of jujube's flowers and fruits[J]. Northern Horticulture, 2011(21):171-173. (in Chinese)
- [6] 江德安. 枣树落花落果原因及防止技术研究[J]. 湖北农业科学, 2002(4):67-68,72.
JIANG Dean. Study on the cause of jujube flower and fruit drop and its control techniques[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2002(4):67-68,72. (in Chinese)
- [7] 宋丽华,秦芳,白祥,等. 气温升高与干旱胁迫对灵武长枣坐果与果实品质的影响[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(2):129-133.
SONG Lihua, QIN Fang, BAI Xiang, et al. Effect of elevated temperature and drought stress on fruit setting rate and fruit quality of Lingwu long jujuba[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2):129-133. (in Chinese)
- [8] 陈焕武. 榆林枣树开花期气象条件分析[J]. 陕西气象, 2008(1):42-43.
- [9] 胡瑾,荆昊男,高攀,等. 融合黄瓜光质需求的设施光环境智能调控模型[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(9):329-336.
HU Jin, JING Haonan, GAO Pan, et al. Intelligent regulation model of light environment for facility cucumbers with light quality demand[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):329-336. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190938&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.038. (in Chinese)
- [10] 毛罕平,晋春,陈勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):1-13.
MAO Hanping, JIN Chun, CHEN Yong. Research progress and prospect on control methods of greenhouse environment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):1-13. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.001. (in Chinese)
- [11] 樊丁宇,肖雷,周晓明,等. 枣农间作环境效应及其对红枣坐果率的影响研究[J]. 新疆农业科学, 2015, 52(3):450-454.
FAN Dingyu, XIAO Lei, ZHOU Xiaoming, et al. Study on environmental effect and fruit set percentage of jujube in jujube-crops intercropping system[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2015, 52(3):450-454. (in Chinese)

[12] 洪明,赵经华,马英杰,等. 干旱绿洲区枣园冠层微环境调控效应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1):16–22.
HONG Ming, ZHAO Jinghua, MA Yingjie, et al. Micro environmental regulation effect of red jujube trees' canopy in arid oasis region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1):16–22. (in Chinese)

[13] 申晓晶,李王成. 宁夏老压砂地枣树不同水分条件下的光合特性研究[J]. 节水灌溉, 2015(5):12–15,19.
SHEN Xiaojing, LI Wangcheng. Research on photosynthetic characteristics of jujube planted in gravel-covering land under different moisture in Ningxia[J]. Water Saving Irrigation,2015(5):12–15,19. (in Chinese)

[14] 谢连杰. 冬小麦生育中后期光合源分布及不同茎生叶光合性能研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2008.

[15] 滕小锱,赵凤君,韩锦,等. 黑杨无性系日 CO₂固定总量的测定及与苗木生产潜势的相关性研究[J]. 河北林果研究, 2005(1):21–25,43.
TENG Xiaonuo, ZHAO Fengjun, HAN Jin, et al. A correlation research on determination of the daily fixed CO₂ gross in black Italian poplar clone and nursery stock production potentiality [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2005(1): 21–25,43. (in Chinese)

[16] 张海辉,张珍,张斯威,等. 黄瓜初花期光合速率主要影响因素分析与模型构建[J/OL]. 农业机械学报,2017, 48(6): 242–248.
ZHANG Haihui, ZHANG Zhen, ZHANG Siwei, et al. Analysis of main influencing factors and modeling of photosynthetic rate for cucumber at initial flowering stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 242–248. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170631&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.031. (in Chinese)

[17] 赵超,刘晓嘉,才燕,等. 空气湿度对对开蕨组培苗光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9):111–115.
ZHAO Chao, LIU Xiaojia, CAI Yan, et al. Effects of air humidity on photosynthetic characteristics of *Phyllitis japonica* tissue culture seedlings[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014, 42(9):111–115. (in Chinese)

[18] SU Peixi, LIU Xinmin. Photosynthetic characteristics of linze jujube in conditions of high temperature and irradiation[J]. Scientia Horticulturae, 2004, 104(3):339–350.

[19] 刘思,王志磊,张军翔. 葡萄行内覆盖对园区微域生态环境及果实品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(6):73–79,88.
LIU Si, WANG Zhilei, ZHANG Junxiang. Effects of within-row mulching on soil microsites in vineyard and fruit quality[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2019, 47(6):73–79,88. (in Chinese)

[20] 王紫寒,张伟,关利平,等. 避雨栽培对泽香葡萄微环境和果实品质的影响[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2015(3):14–17.
WANG Zihan, ZHANG Wei, GUAN Liping, et al. Effects of rain-shelter cultivation on the microclimate and fruit quality of Zexiang(*V. vinifera* L)[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2015(3):14–17. (in Chinese)

(上接第 266 页)

[31] GU C, MU X, GAO P, et al. Changes in runoff and sediment load in the three parts of the Yellow River basin, in response to climate change and human activities[J]. Hydrological Processes, 2018, 33(4): 585–601.

[32] ZHAO G, MU X, TIAN P, et al. Climate changes and their impacts on water resources in semiarid regions: a case study of the Wei River basin, China[J]. Hydrological Processes, 2012, 27(26): 3852–3863.

[33] 赵阳,余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(3): 39–45.
ZHAO Yang, YU Xinxiao. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of loess hilly-gully region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(3): 39–45. (in Chinese)

[34] DWARAKISH G S, GANASRI B P, DE STEFANO L. Impact of land use change on hydrological systems: a review of current modeling approaches[J]. Cogent Geoscience, 2015, 1(1): 1115691.

[35] SRIWONGSITANON N, TAESOMBAT S W. Effects of land cover on runoff coefficient[J]. Journal of Hydrology, 2011, 410(3–4):226–238.

[36] CAMACHO S V V, SAREIVA O A M L, WENNINGER J W, et al. Understanding runoff processes in a semi-arid environment through isotope and hydrochemical hydrograph separations[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015, 19(1): 4183–4199.

[37] YU Y, WEI W, CHEN L, et al. Responses of vertical soil moisture to rainfall pulses and land uses in a typical loess hilly area, China[J]. Solid Earth, 2015, 6(2): 595–608.

[38] YANG Y, XIAO P, FENG X, et al. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 125: 156–173.

[39] LI H, SI B, LI M. Rooting depth controls potential groundwater recharge on hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2018, 564(7): 164–174.