

# 基于冠气温差的枣树根区土壤水分预报模型

王东豪<sup>1</sup>, 张江辉<sup>2</sup>, 白云岗<sup>2</sup>, 刘洪波<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水利水电科学研究院, 新疆乌鲁木齐 830049)

**摘要:** 针对目前果树水分亏缺状况难以迅速准确地监测与预报的问题,以冠气温差理论模型为基础,建立以冠气温差为指标的枣树根区土壤水分预报模型,采用回归分析法分析土壤相对含水量与冠气温差及气象因子间的关系,对模型进行具体化,并对模型可靠性进行分析。结果表明:晴天日 14:00 时枣树冠气温差与根区土壤水分关系最为显著( $P < 0.01$ );采用完全预报模型可以较为准确地得到枣树根区土壤水分状况( $MRE \leq 6\%$ );采用概化预报模型可以在一定误差范围内( $MRE \leq 10\%$ )预报枣树根区土壤水分状况;枣树生长期冠气温差高于阈值,表明枣树需要灌溉,否则不需要灌溉。基于冠气温差的枣树根区土壤水分预报模型能够有效的诊断枣树水分亏缺状况,为枣树的科学灌溉提供指导。

**关键词:** 冠气温差; 枣树根区; 土壤水分预报; 回归分析法

中图分类号: S16; S665.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)05-0255-06

## Model for predicting soil moisture in root region of jujube based on canopy-air temperature differential

WANG Donghao<sup>1</sup>, ZHANG Jianghui<sup>2</sup>, BAI Yungang<sup>2</sup>, LIU Hongbo<sup>2</sup>

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

**Abstract:** It is difficult to monitor and predict the fruiter water deficit quickly and accurately at present. A model for predicting soil moisture in root region of jujube was established with canopy-air temperature differential as the indicator, which was based on the theoretical model of canopy-air temperature differential. Regression analysis was used to analyze the relationship between relative water content of soil, canopy-air temperature differential and meteorological factors, which made the model become more specific. Furthermore, the reliability of the model was analyzed. The results showed that the relationship between canopy-air temperature differential and the soil moisture in the root zone of jujube was the most significant ( $P < 0.01$ ) at 14:00 on sunny days. The soil moisture condition of jujube root area could be obtained more accurately by using the complete predicting model (average relative error  $MRE \leq 6\%$ ). The generalized predicting model could be used to predict soil moisture in jujube root region within a certain error range (average relative error  $MRE \leq 10\%$ ). The canopy-air temperature differential was higher than the threshold value in jujube tree growth period, indicating that the jujube needed irrigation, otherwise irrigation is not needed. The model for predicting soil moisture in root region of jujube based on canopy-air temperature differential can diagnose jujube water deficit effectively and provide guidance for scientific irrigation of jujube.

**Key words:** canopy-air temperature differential; jujube root region; soil moisture predicting; regression analysis method

收稿日期:2018-01-17; 修回日期:2018-03-04

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400208)

作者简介:王东豪(1993-),男,山东济南人,在读研究生,研究方向为内陆干旱区水文过程及水资源利用。

通讯作者:白云岗(1974-),男,新疆奇台人,博士,教授级高工,主要从事农业水土工程方面的研究工作。

## 1 研究背景

了解并掌握植物生长对水分亏缺响应规律,迅速而准确地诊断植物水分状况是优化灌溉决策的基础。冠气温差反映了植物与大气及土壤之间的能量交换,是表征植物生理生态过程及能量平衡状况的重要参数<sup>[1-3]</sup>。近年来随着红外测温技术的快速发展,冠气温差法正成为诊断植物水分状况的重要手段之一,能够快速测定较大范围的植物水分状况<sup>[4-5]</sup>。在农作物研究领域,通过监测作物冠气温差预报作物及土壤水分状况,在基础理论及应用研究方面已经取得了重要进展<sup>[6-17]</sup>。在果树学研究领域,国内外学者在试验研究与果树水分亏缺预报模型构建方面也取得了一定进展。试验研究方面,Remorini等<sup>[18]</sup>就桃树叶温与植株水分状况的关系进行了初步分析;Ballester等<sup>[19]</sup>研究指出冠气温差能够较好地预测柑橘的水分亏缺状况;Giuliani等<sup>[20]</sup>研究指出利用树体热像数据监测苹果树及桃树水分胁迫具有很好的理论基础及应用前景。预报模型构建方面,张劲松等<sup>[21]</sup>与孟平等<sup>[22]</sup>在分析苹果树冠气温差与气象因子及土壤含水量间关系的基础上,提出了基于冠气叶气温差的苹果园土壤水分预报模型;李涛等<sup>[23]</sup>从气象学理论的角度阐明了冠层温度与大气温度的关系,提出了以能量守恒定律为基础的冠气温度模拟模型。但总体而言,冠层温度在果树水分状况诊断方面的理论及应用研究仍较少,对于枣树冠气温差方面的应用研究未见报道。本文以冠气温差理论公式为基础,分析冠气温差与冠层净辐射、空气相对湿度、风速等冠层微气象要素及土壤含水量的理论关系,得到基于冠气温差的枣树根区土壤水分预报模型;利用红外测温仪观测得到枣树主要生长季节冠层温度、冠层微气象要素及枣树根区土壤含水量实测数据,推求预报模型参数,对所建模型进行验证;在此基础之上,提出枣树冠气温差阈值。旨在提供以冠气温差为基础的枣树水分状况诊断方法,为发展研究区枣树适时适量的高效灌溉提供理论指导,促进农业灌溉水资源的高效利用。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验区概况

试验区设在新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局灌溉试验站。试验区地处亚欧大陆中心,新疆腹地,塔里木盆地北缘,东经 $86^{\circ}10'$ ,北纬 $41^{\circ}35'$ ,海拔

905 m左右,属暖温带大陆性荒漠气候,干旱少雨且风沙较多,蒸发强烈,昼夜温差大,多年平均降水量58.6 mm,年最大蒸发量2 788.2 mm(E20蒸发皿),年平均风速2.4 m/s,最大风速22 m/s,年平均气温 $11.5^{\circ}\text{C}$ ,最低气温 $-30.9^{\circ}\text{C}$ ,最高气温 $42.2^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数2 860~3 096 h,无霜期约为191 d。试验区灌溉水主要来自孔雀河,平均灌水矿化度为0.8 g/L,土壤以砂质壤土为主,环刀法测得0~100 cm土层平均容重为 $1.63\text{ g/cm}^3$ ,饱和含水量为 $0.4427\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,田间持水量 $0.2798\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,有机质含量8.09~9.85 g/kg,速效氮19.3~65.5 mg/kg,速效磷8.9~13.2 mg/kg,速效钾49.5~86.4 mg/kg。

### 2.2 试验材料和方法

研究区枣树为10 a生成龄灰枣,株行距 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ ,株高2.6~3.2 m,冠幅3~4 m,垂直0~100 cm水平0~150 cm土层范围内吸收根根量占枣树总吸收根根量的85%左右,为枣树的主要根系层。枣树生长期约为180 d,分为5个主要生育时段,萌芽期(4月上旬至4月中旬),展叶期(4月下旬至5月中旬),开花期(5月下旬至7月上旬),幼果膨大期(7月上旬至8月下旬),可开采收成熟期(9月上旬至10月中旬)。枣树采用漫灌方式进行灌溉,灌溉定额为 $15\ 000\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,根据枣树不同生育期需水,分10次进行灌水。主要观测内容及方法如下:

2.2.1 枣树冠层小气候观测 在研究区中部选择两个试验点A和B(图1),在试验点A选择4株代表性较好的以呈矩形分布的相邻枣树,在矩形中心处设置iMetos气象环境自动监测系统,在活动面(高度约2.0 m)上1.5 m高度采用CMP3、NHJQ55、IM5021D、A660611、05103L、IM5231传感器(探头)分别连续观测太阳总辐射 $Q$ 、冠层净辐射 $R_n$ 、空气温度 $T_a$ 、相对湿度 $RH$ 、风速 $WS$ 及降雨量 $P$ 。系统采用CR1000X数据采集器每2 min采集1次数据,每10 min输出1组平均值。观测时期为2017年4月1日至2017年9月30日,枣树全生育阶段降雨量与 $ET_0$ 如图2所示。

2.2.2 枣树冠层叶温观测 在2017年4月至9月典型晴天日14:00时,分别在试验点A和B,采用FLUKE红外测温仪,于枣树冠层上方0.5 m左右处,顺太阳辐射方向、以 $45^{\circ}$ 俯角测定冠层叶温 $T_c$ ,每棵枣树测3次,共测12个观测值,取平均值作为枣树冠层叶温值;并于2017年4月至9月于选择典型晴天、阴天日,在试验点A,观测 $T_c$ 日变化,每旬观测2~3 d。观测时间8:00~20:00,每1 h观测1次。

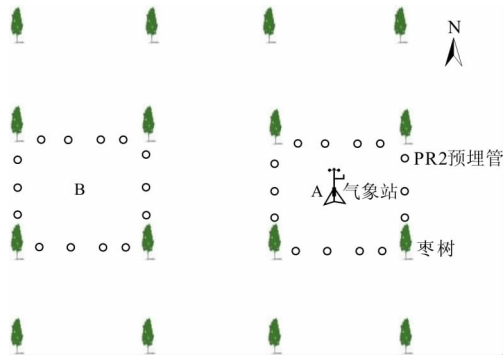


图 1 土壤水分观测布置示意图

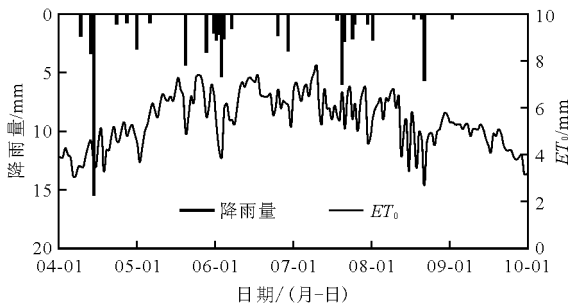


图 2 2017 年观测期枣树全生育阶段降雨量与  $ET_0$

2.2.3 土壤水分观测 在上述试验点 A 和 B 的 4 棵枣树所组成的矩形小区内,于南、北向株间连线上等距离各位置 3 个观测点,东、西向行间连线上等距离各布置 4 个观测点(图 1)。于晴天日的 12:00 - 16:00 时段内,采用 PR2 土壤剖面水分速测仪每隔 20 cm 测定土壤体积含水量,测定深度 0 ~ 100 cm,每隔 3 ~ 5 d 测定 1 次,降雨、灌水后加测。观测时间为 2017 年 4 月 1 日至 9 月 30 日。

2.3 理论分析

Jackson 等<sup>[24]</sup>在冠层表面能量平衡与 Penman - Monteith 公式的基础上给出了冠气温差的理论公式为:

$$\Delta T = \frac{r_a R_n}{\rho C_p} \cdot \frac{\gamma(1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} - \frac{e_s - e_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (1)$$

式中: $\Delta T$ 为冠气温差, $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_n$ 为冠层净辐射, $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $\rho$ 为空气密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_p$ 为空气热容量, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $\gamma$ 为温度计常数, $0.066 \text{ kPa}/^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta$ 为饱和水汽压 - 温度关系曲线斜率;  $T_a$ 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $e_s$ 为空气的饱和水汽压, $\text{kPa}$ ;  $e_a$ 为空气实际的水汽压, $\text{kPa}$ ;  $r_c$ 和  $r_a$ 分别为植物冠层阻力和空气动力学阻力, $\text{s}/\text{m}$ 。

由公式(1)可知,冠气温差  $\Delta T$  与冠层净辐射  $R_n$ 、植物冠层阻力  $r_c$ 、空气动力学阻力  $r_a$  以及空气饱和压差( $e_s - e_a$ ) 密切相关。空气饱和压差( $e_s - e_a$ )

可以用空气相对湿度  $RH$  来反映。空气动力学阻力  $r_a$  与植物株高  $H$  及风速  $WS$  密切相关。植物冠层阻力  $r_c$  主要由叶面阻力和气孔阻力所控制,与叶面积指数、气孔特性及植物水势直接相关,而植物水势又与土壤含水量密切相关,因此,植物冠层阻力  $r_c$  可以用叶面积指数  $LAI$ 、气孔特性  $SC$  及土壤含水量  $SW$  表示。

以上分析表明,冠气温差  $\Delta T$  与冠层净辐射  $R_n$ 、相对湿度  $RH$ 、风速  $WS$ 、植物株高  $H$ 、叶面积指数  $LAI$ 、气孔特性  $SC$  及土壤含水量  $SW$  均有关。这一关系可以表示为:

$$\Delta T = f(R_n, RH, WS, H, LAI, SC, SW) \quad (2)$$

对于成龄果树,株高  $H$  几乎不发生变化。假定在果树的整个生育时段,单位叶面积的气孔导水能力相同,则整个生育阶段单位面积植物叶片对冠气温差的影响程度相同,由此,可将式(2)简化为:

$$\Delta T = f(R_n, RH, WS, SW) \quad (3)$$

田间持水量  $FC$  是植物的有效水分上限,通常作为计算灌溉定额的标准。因此,采用土壤相对含水量  $RSW$  来表示土壤水分状况:

$$RSW = \frac{SW}{FC} \quad (4)$$

基于以上分析,以土壤相对含水量  $RSW$  为预测值,以冠气温差  $\Delta T$  与冠层净辐射  $R_n$  相对湿度  $RH$  及风速  $WS$  为自变量,可建立基于冠气温差的枣树根区土壤水分完全预报模型:

$$RSW = F(\Delta T, R_n, RH, WS) \quad (5)$$

在缺乏气象资料的情况下,以土壤相对含水量  $RSW$  为预测值,以冠气温差  $\Delta T$  为自变量,建立基于冠气温差的枣树根区土壤水分概化预报模型:

$$RSW = P(\Delta T) \quad (6)$$

由于公式(5)和(6)的确切关系尚不清楚,采用回归分析的方法,确定基于冠气温差的枣园根区土壤水分完全及概化预报模型表达式,并以不同生育阶段的临界土壤含水量为基础,确定不同阶段的临界冠气温差  $\Delta T$ ,为枣树的科学灌溉及基于冠气温差的枣树水分亏缺诊断提供指导。

3 结果与分析

3.1 枣树冠气温差的日变化特征

众多研究表明<sup>[11,14]</sup>,植物冠气温差在一天之内呈现不同的变化,不同植物的冠气温差日变化特征存在显著的差异。为了准确的利用冠气温差预报枣树根区土壤水分,有必要对枣树冠气温差的日变化特征进行研究。

将2017年枣树萌芽期、展叶期、开花期、幼果膨大期及可开采成熟期的典型晴天日(4月11日、5月12日、6月18日、8月7日及9月18日)与典型阴天日(4月18日、5月11日、6月30日、7月26日及9月14日)冠气温差 $\Delta T$ 日变化点绘于图3。由图3可以看出,枣树各生育时段的 $\Delta T$ 日变化均成多峰曲线分布趋势,基本遵循抛物线轨迹,且各生育期 $\Delta T$ 最高值都出现在14:00左右。典型晴天枣树 $\Delta T$ 变化幅度不同,且整体处于负值,这主要是由于枣树的不同生育期的气象条件和土壤水分状况不同,枣树的 $\Delta T$ 最低值可以达到 $-7.3^{\circ}\text{C}$ 。阴天天气条件下, $\Delta T$ 绝对值明显低于晴天日,说明阴天日枣树冠层冠气温差不如晴天明显,如5月11日(阴天日)

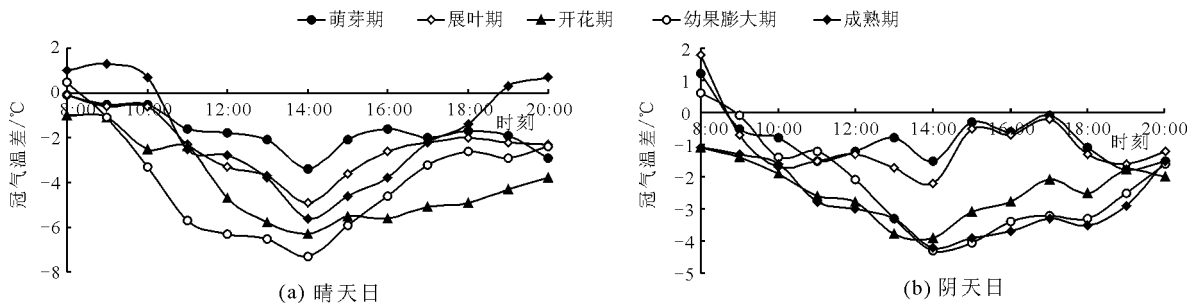


图3 典型晴天日与阴天日冠气温差日变化曲线

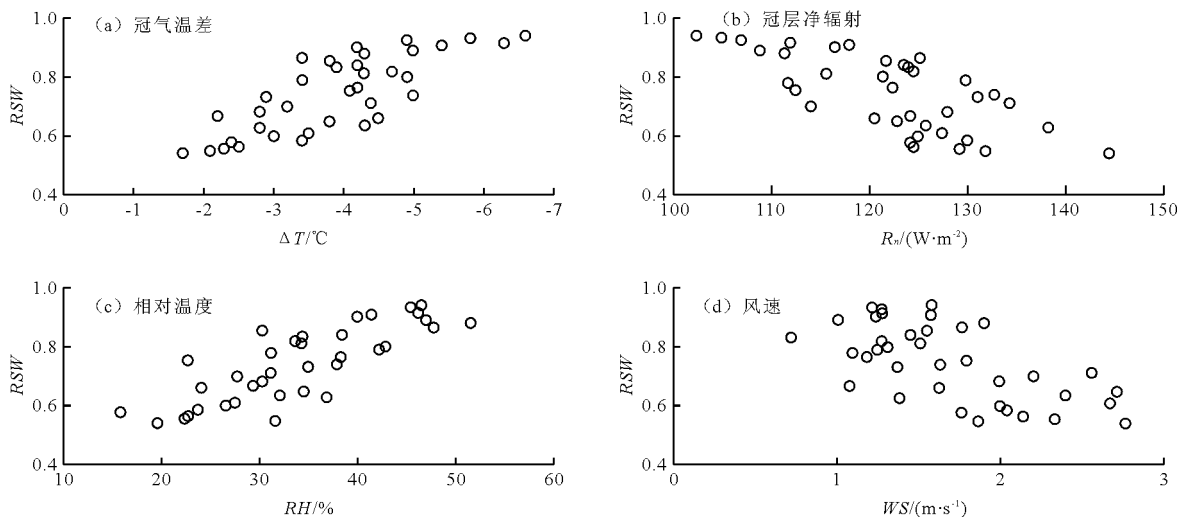


图4 土壤相对含水量与冠气温差、冠层净辐射、相对湿度及风速关系的散点图

由图4可知,土壤相对含水量 $RSW$ 与冠气温差 $\Delta T$ 、冠层净辐射 $R_n$ 、相对湿度 $RH$ 及风速 $WS$ 都存在较强的线性关系。因此,采用多元线性回归,对土壤相对含水量 $RSW$ 与冠气温差 $\Delta T$ 、冠层净辐射 $R_n$ 、相对湿度 $RH$ 及风速 $WS$ 之间的关系进行回归,得到回归方程为:

$$RSW = 0.807 - 0.043\Delta T - 0.002R_n + 0.004RH - 0.07WS \quad (7)$$

的 $\Delta T$ 值变化范围为 $-2.2 \sim 1.8^{\circ}\text{C}$ ,而临近的5月12日晴天日,其 $\Delta T$ 值变化范围高达 $-4.9 \sim -0.1^{\circ}\text{C}$ 。因此,预报枣树根区土壤水分应当选择晴天日14:00左右的冠气温差。

### 3.2 基于冠气温差的枣树根区土壤水分预报模型

由于基于冠气温差的枣树根区土壤水分完全预报模型与概化预报模型式(5)和式(6)的确切关系尚不清楚,即土壤相对含水量 $RSW$ 与冠气温差 $\Delta T$ 、冠层净辐射 $R_n$ 、相对湿度 $RH$ 及风速 $WS$ 4个指标因子的关系尚不明确。因此,首先进行预处理,分别绘制土壤相对含水量 $RSW$ 与冠气温差 $\Delta T$ 、冠层净辐射 $R_n$ 、相对湿度 $RH$ 及风速 $WS$ 关系的散点图如图4所示。

式中: $RSW$ 为无量纲参数, $\Delta T$ 、 $R_n$ 、 $WS$ 的单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{W}/\text{m}^2$ 、 $\text{m}/\text{s}$ , $RH$ 以%表示。回归方程复相关系数 $r$ 为0.916,显著性水平 $P < 0.01$ ,说明回归模型具有统计学意义,均方根误差 $RMSE$ 为0.0560,平均相对误差 $MRE$ 为5.4%。因此,当气象数据较全时,以公式(7)作为基于冠气温差的枣树根区土壤水分完全预报模型,可以获得较准确( $MRE \leq 6\%$ )预报枣树根区的土壤水分状况。

当缺乏气象数据时,采用简单线性回归分析,对土壤相对含水量  $RSW$  与冠气温差  $\Delta T$  之间的关系进行回归,得到回归方程:

$$RSW = 0.412 - 0.086\Delta T \quad (8)$$

回归方程相关系数  $r = 0.818$ ,显著性水平  $P < 0.01$ ,回归模型具有统计学意义,均方根误差  $RMSE$  为 0.0774,平均相对误差  $MRE$  为 8.9%。因此,当缺乏气象数据时,以式(8)作为基于冠气温差的枣树根区土壤水分概化预报模型,在一定误差范围内 ( $MRE \leq 10\%$ ) 可以预报枣树根区土壤水分状况。

### 3.3 基于冠气温差枣树根区土壤水分预测模型的验证

为了检验基于冠气温差的枣树根区土壤水分完全预报模型与概化预报模型公式(7)与(8)的可靠性,本文采用试验点 B 的 35 组数据,对观测数据进行验证。结果表明:完全预报模型与概化预报模型均能较好的预报枣树根区土壤水分状况(图 5)。完全预报模型模拟值与实测值的均方根误差  $RMSE$  为 0.0485,平均相对误差  $MRE$  为 4.4%,最大和最小相对误差分别为 19.4%、0.2%;概化预报模型模拟值与实测值的均方根误差  $RMSE$  为 0.0734,平均相对误差  $MRE$  为 8.6%,最大和最小相对误差分别为 27.5%、0.9%。由此可见,当枣园气象资料完整时,应该采用完全预报模型式(7),对枣树根区土壤水分进行准确预报,当缺乏气象资料时,采用概化预报模型式(8),也能够对枣树根区土壤水分进行较好的预报。

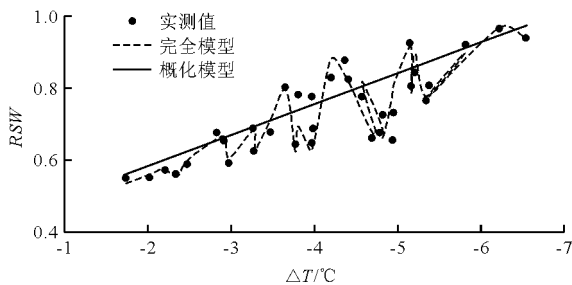


图 5 相对土壤含水量的实测值与预测值

### 3.4 基于冠气温差的枣树灌溉决策

为了采用冠气温差  $\Delta T$  指导枣树灌溉决策,首先要确定枣树需要灌溉冠气温差阈值  $\Delta T_r$ ,根据枣树的灌溉试验成果,可以确定枣树不同生育期的土壤相对含水量阈值  $RSW_r$ ,将  $RSW_r$  代入式(8),就可以得到枣树不同生育阶段的  $\Delta T_r$ 。大量研究表明,枣树从发芽到果实开始成熟,土壤水分以保持田持的 65% ~ 70% 为宜,因此,设定枣树萌芽、展叶期和开花期  $RSW_r$  为

0.65,幼果膨大期  $RSW_r$  为 0.70,可开采成熟期  $RSW_r$  为 0.60。枣树不同生育阶段的  $\Delta T_r$  为:

$$\Delta T_r = \begin{cases} -2.77^\circ\text{C} & \text{萌芽、展叶、开花期} \\ -3.35^\circ\text{C} & \text{膨大期} \\ -2.19^\circ\text{C} & \text{可开采成熟期} \end{cases} \quad (9)$$

当冠气温差  $\Delta T > \Delta T_r$ ,即当枣树萌芽、展叶、开花期冠气温差  $\Delta T > -2.77^\circ\text{C}$ ,幼果膨大期  $\Delta T > -3.35^\circ\text{C}$ ,可开采成熟期  $\Delta T > -2.19^\circ\text{C}$ 时,表明枣树需要灌溉,冠气温差  $\Delta T < \Delta T_r$ ,则表明枣树不需要灌溉。

## 4 结 论

(1)枣树各生育期冠气温差呈现多峰曲线分布趋势,晴天冠气温差变化幅度大于阴天,应当选择晴天日 14:00 左右的冠气温差预报枣树根区土壤水分状况。

(2)基于冠气温差枣树根区土壤水分预测模型具有较高的可靠性,当气象数据充足,采用完全预报模型可以较为准确得到枣树根区土壤水分状况;当缺乏气象数据时,采用概化预报模型可以在一定的误差范围内预报枣树根区土壤水分状况。

(3)以冠气温差阈值为指标,当不同生育期枣树冠气温差高于阈值时,表明枣树需要灌溉,否则不需要灌溉。

目前,农业气象领域冠层叶温和气温测定技术和方法已比较成熟,结合所建模型能够有效监测和预报枣树根区水分状况,指导枣树适时适量灌溉,但冠气温差与枣树生理过程的内在关系,还需结合测定果树生理生化指标作进一步分析研究。

### 参考文献:

[1] CONATY W C, MAHAN J R, NEILSEN J E, et al. The relationship between cotton canopy temperature and yield, fibre quality and water-use efficiency[J]. Field Crops Research, 2015,183:329 - 341.

[2] WEBBER H, MARTRE P, ASSENG S, et al. Canopy temperature for simulation of heat stress in irrigated wheat in a semi-arid environment: A multi-model comparison [J]. Field Crops Research, 2015,202:21 - 35.

[3] 黄凌旭,蔡甲冰,白亮亮,等. 利用作物冠气温差估算农田蒸散量[J]. 中国农村水利水电, 2016(8):76 - 82.

[4] TAGHAEIAN S, COMAS L, DEJONGE K C, et al. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower[J]. Agricultural Water Management, 2014,144(2):69 - 80.

- [5] 孙浩, 黄华国, 解潍嘉, 等. 基于土壤冠层组分温差监测侧柏蒸腾速率的研究[J]. 中南林业调查规划, 2016, 35(1):34-45.
- [6] CONATY W C, MAHAN J R, NEILSEN J E, et al. Vapour pressure deficit aids the interpretation of cotton canopy temperature response to water deficit[J]. Functional Plant Biology, 2014, 41(5):535.
- [7] PINTO R S, REYNOLDS M P. Common genetic basis for canopy temperature depression under heat and drought stress associated with optimized root distribution in bread wheat [J]. TAG. Theoretical and Applied Genetics. Theoretische and Angewandte Genetik, 2015, 128(4):575-585.
- [8] YAN Chuan, CHEN Heyun, FAN Tianyun, et al. Rice flag leaf physiology, organ and canopy temperature in response to water stress. [J]. Plant Production Science, 2015, 15(2):92-99.
- [9] KIMBALL B A, WHITE J W, WALL G W, et al. Infrared-warmed and unwarmed wheat vegetation indices coalesce using canopy-temperature-based growing degree days [J]. Agronomy Journal, 2015, 104(1):114-119.
- [10] 魏征, 许迪, 刘钰, 等. 基于冠气温差的冬小麦水分亏缺诊断试验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(8):984-990.
- [11] 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12):133-139.
- [12] 屈振江, 郑小华, 王景红, 等. 渭北旱塬苹果园内外温度变化特征研究[J]. 干旱区地理(汉文版), 2016, 39(2):301-308.
- [13] 高继平, 隋阳辉, 张文忠, 等. 水稻灌浆期冠层温度对植株生理性状及稻米品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(5):501-510.
- [14] 邓娟娟, 李春友, 阚颖欣, 等. 高羊茅成坪期冠气温差时间变化特征及其环境影响因子关系研究[J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(1):000049-53.
- [15] 杨景, 张玉雪, 姚梦浩, 等. 小麦不同生育期大气温度与冠层温度关系研究[J]. 金陵科技学院学报, 2017, 33(1):49-53.
- [16] 高继平, 张文忠, 隋阳辉, 等. 水分胁迫下水稻拔节孕穗期冠气温差与产量及品质的关系[J]. 核农学报, 2016, 30(3):596-604.
- [17] 姜伟平, 孙科, 吉宗伟. 春季茶树冠层温度与气象因子的关系及预测[J]. 中国农学通报, 2014, 30(28):144-152.
- [18] REMORINI D, MASSI R. Comparison of water status indicators for young peach trees [J]. Irrigation Science, 2003, 22(1):39-46.
- [19] BALLESTER C, CASTEL J, JIMENEZ BELLO M A, et al. Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees[J]. Agricultural Water Management, 2013, 122(1):1-6.
- [20] GIULIANI R, FLORE J A, FERREIRA M I, et al. Potential use of infra-red thermometry for the detection of water stress in apple trees. [J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(537):383-392.
- [21] 张劲松, 孟平, 高峻, 等. 基于冠层叶气温差的苹果园土壤水分预报模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):17-20.
- [22] 孟平, 张劲松, 高峻, 等. 苹果树冠层-空气温差变化及其与环境因子的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(9):2030-2034.
- [23] 李涛, 张建丰, 曾辰, 等. 深层坑渗灌条件下葡萄果浆成熟期冠层温度的试验研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):351-355.
- [24] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4):1133-1138.

## 喜 讯

《水资源与水工程学报》被中国科学引文数据库(Chinese Science Citation Database, 简称 CSCD)收录为 2017-2018 年度来源期刊。2017 年又被中国科学评价中心(RCCE)、武汉大学图书馆和中国科教评价网联合完成的第五版《中国学术期刊评价报告(2017-2018)》评价为 A 类核心期刊。