

基于冠层叶气温差的苹果园土壤水分预报模型

张劲松, 孟平, 高峻, 王鹤松, 褚建民

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 该研究于 2003~2004 年采用便携式红外测温仪观测得到苹果主要生长季节晴天 14:00 时冠层叶温数据, 结合同步观测得到的空气温度数据及 0~80 cm 土壤相对有效含水率, 分析、建立以苹果树冠层叶气温差为指标的果园水分预报模型。该模型中, 土壤相对有效含水率和冠层叶气温差的相关系数为 $-0.819 (n=50)$, 通过 0.01 水平显著性检验。并利用 2002 年及 2005 年的实测土壤水分数据对所建模型进行验证, 结果表明: 土壤相对有效含水率的观测值与计算值吻合较好, 二者线性相关系数可达 $0.9137 (n=40)$ 。可见, 采用 14:00 时冠层叶气温差诊断苹果园土壤水分胁迫状况是可行的。

关键词: 苹果园; 冠层叶气温差; 土壤水分

中图分类号: S16; S661.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)6-0017-04

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.

Zhang Jinsong, Meng Ping, Gao Jun, et al. Model for predicting soil water status based on the canopy-air temperature differential in apple orchard[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6): 17-20. (in Chinese with English abstract)

0 引言

了解、掌握植物生长对水分亏缺反应的规律, 及时准确地判断水分亏缺程度是制定适时适量灌溉决策的理论基础。冠层温度是表征植物生理生态过程及能量平衡状况的重要参数之一, 是用于探测和评价植物水分状况的重要指示。自 Tanner(1963) 首先提出用红外测温仪可探测作物蒸腾速率和水分状况以来, 红外测温技术发展迅速, 通过观测作物的冠层表面温度进而诊断作物是否遭受水分胁迫, 作为一项具备诸多优点的技术在国外已相当成熟^[1]。其中, 通过监测作物冠气温差, 预报农田土壤水分, 以实现适时灌溉等相关研究已取得重要进展^[2-19]。在果树学研究领域, Giuliani 等(2000)^[20] 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, Anconelli 等(1999)^[21] 及 Massai(2000)^[22] 就葡萄叶温与水分胁迫系数的关系、Remorini 等(2003)^[23] 就桃树叶温与植株水分状况的关系进行了初步分析。但总体而言, 冠层温度在果树水分诊断方面的应用研究仍较少。本文以苹果冠气温差为指标, 建立苹果园主要生长季节土壤水分预测模型, 并利用实测数据对所建模型进行验证, 旨在为试验区所在地节水林果业的发展提供理论依据及技术支持, 促进

植物冠气温差在林学领域的应用研究, 进一步丰富节水林业理论及技术体系。

1 试验设计

1.1 试验区概况

试验地设在河南省济源市裴村“太行山低山丘陵区复合农林业综合研究”试验区内(35°11'N, 112°03'E)。试验区地处太行山南段南麓, 属温带大陆性季风气候。全年日照时数为 2367.7 h, 年日照百分率为 54%; 大于等于 0、10℃ 的积温分别为 5282、4847℃; 年降水量 641 mm, 但由于受季风气候的影响, 年内季节性分布不均匀。6~9 月份多年平均降水量为 438 mm, 占全年的 68.3%。试验区土壤以石灰岩风化母质淋溶性褐色土为主, 土层厚度 50~80 cm, pH 值 6.8~8.5, 石砾含量为 10%~18%, 有机质含量在 10 g/kg 左右, 速效氮 21.4~80.0 mg/kg, 速效磷 5.4~16 mg/kg, 速效钾 60~103 mg/kg。

1.2 试验材料及方法

本研究对象是水平梯田苹果园, 梯田坐北朝南, 南北宽度 36 m、东西长度 200 m, 株行距 3 m×4 m, 株高 2.4 m, 南北冠幅 3.7 m, 郁闭度 98%。栽植于 1992 年, 果树带行向为东西向, 苹果品种: 新红星(Starkrimson)。主要观测内容及方法如下:

1) 冠层小气候观测

在试验地中部选择 4 株代表性较好的以呈矩形分布的相邻果树, 在矩形中心处活动面(高度约 1.6 m)上 0.5、1.5 m 高度处利用小气候自动监测系统连续观测空气温度(T_a)、相对湿度(RH)及风速(V), 活动面上

收稿日期: 2006-09-17 修订日期: 2007-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30371186); 国家“十五”攻关课题(2001/2004BA510B04); 中国林业科学研究院重点基金资助项目

作者简介: 张劲松(1968-), 博士, 研究员, 主要研究方向: 农(林)业气象、复合农林业。北京 中国林业科学研究院林业研究所 100091。Email: zhangjs@caf.ac.cn

1.0 m 高度处观测太阳总辐射 (Q)、冠层净辐射 (R_n)、降雨量 (P), 并于其中一棵树的南、北冠幅边缘活动面上 1.0 m 高度处再同步观测 R_n 、 Q 、 R_n 、 V 、 T_a 和 RH 、 P 所采用的传感器(探头)分别为 LI200X、Q7_1、05103、HMP45C、TE525M。数据采集器为 CR10X, 每 2 min 采集 1 次, 每 10 min 输出 1 组平均值。观测时期: 2003 年 1 月 1 日至 2005 年 12 月 31 日。并于 2002 年 4 至 9 月, 选择典型晴天日的 14:00 时刻, 采用通风干湿表观测冠层活动面上 1.0 m 处的 T_a 及 RH 值。

2) 苹果树冠层叶温观测

2002、2003、2004 及 2005 年于 4 月至 9 月典型晴天日 14:00 时用 ERS 红外叶温仪, 于苹果树冠层上方 0.5 m 左右处, 顺太阳辐射方向、以 45°俯角测定冠层叶温 (T_c), 取 12 个观测值的平均值为 1 次观测所得值; 并于 2003 年 4 月至 9 月于选择典型晴天、阴天日, 观测 T_c 日变化, 每旬观测 2~3 d。观测时间: 6:00~19:00, 每 1 h 观测 1 次。

3) 土壤水分观测

① 小区土壤水分观测

在上述 4 棵苹果树所组成的矩形小区内, 于南、北向株间连线上等距离各布置 3 个观测点, 东、西向行间连线上等距离各布置 5 个观测点, 矩形 2 条对角线上等距离各布置 5 个观测点(图 1)。于晴天日的 12:00~16:00 时段内, 采用 CMP 土壤水分频率反射仪每隔 10 cm 土层测定土壤容积含水率, 测定深度为 0~80 cm, 每隔 5~10 d 测定 1 次, 雨后加测。观测时期: 2002、2003、2004 及 2005 年的 4 月 1 日至 9 月 30 日。

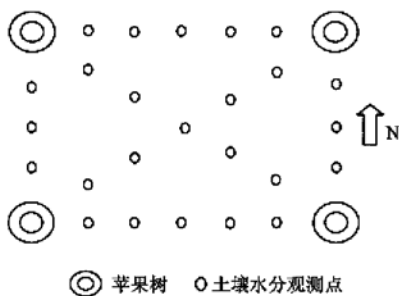


图 1 土壤水分观测点布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling points of soil moisture

② 凋萎湿度与田间持水量的确定

于 2003 年 4 至 9 月, 通过盆栽水分胁迫处理, 采用烘干称重法, 结合容重, 当树叶稳定萎蔫时测定土壤容积含水率, 再将该值视为凋萎湿度或萎蔫系数^[25]。盆栽试材品种同上, 树高: 1.6 m, 树龄: 7 年。盆栽用盆直径 40 cm, 高 80 cm, 每盆装土 50 kg, 盆栽土壤取自试验地

块, 按试验地土层顺序填埋。盆栽树均置于室外, 距试验地 100 m 左右。试验重复数 5 个。在试验地中部的果树行间, 选取 3 个 2 m × 2 m 小区, 采用“小区灌水法”^[24]测定田间持水量。

2 结果与分析

2.1 苹果树冠气温差与微气象因子和土壤水分的关系

众多研究表明^[13, 14, 17, 19]: 植物叶气温差与土壤水分之间的相关程度在 12:00~16:00 时尤为明显, 可用此时段的冠层叶气温差反映作物水分亏缺的程度。本研究回归分析 2003 年及 2004 年苹果树主要生长季节(4 月初~8 月末)晴天日的 14:00 时冠层叶气温差 (ΔT) 与微气象因子和土壤水分的关系, 结果表明: ΔT 与冠层净辐射 (R_n)、空气相对湿度 (RH)、风速 (V) 及土壤容积含水率 (SW) 具有较好的复相关关系, 回归方程为

$$\Delta T = 7.159 - 0.002R_n - 0.061V - 0.7RH - 46.0SW \quad (1)$$

式中 ΔT 、 R_n 、 V 的单位分别为 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; RH 与 SW 以 % 表示。复相关系数 $r = -0.825$, $F = 24.426 > (F_{0.01}^{4,46} = 2.57)$, 通过 0.01 水平显著性检验。 ΔT 与 R_n 、 RH 、 V 及 SW 的偏相关系数 (β) 分别为 -0.125 、 -0.078 、 -0.036 、 -0.874 , 故比较 ΔT 与各因子的 β 可知, 环境因子中土壤水分对 ΔT 的影响最大, 而且经逐步回归分析得到方程中自变量只剩 SW , 方程式如下

$$\Delta T = 5.317 - 43.1SW \quad (2)$$

相关系数 $r = -0.819$, $F = 80.743 > (F_{0.01}^{1,49} = 4.035)$, 通过 0.01 水平显著性检验。将式(2)进行整理, 即可得到以 ΔT 为自变量、以 SW 为因变量的方程式。即可利用 ΔT 预测果园土壤水分。目前, 用土壤含水率评价作物及果树水分状况、制定田间灌溉制度, 在生产实际中仍不失为一种可靠方法。长期以来, 许多科学家和实践工作者将田间持水量 (FW) 视为作物有效水分的上限, 作为计算灌溉定额的标准^[25], 将凋萎系数 (RW) 视为作物缺水的下限。本研究为方便土壤水分模型在生产实践中应用, 同时尽可能消除土壤结构的影响, 提高模拟预测精度或拟合相关系数, 引入土壤相对有效含水率 (RAW)。 RAW 是 SW 、 FW 及 RW 综合影响结果, 其计算公式是

$$RAW = (SW - RW)/(FW - RW) \quad (3)$$

因此, 在上述基础上, 以 RAW 为预测值或因变量、以 ΔT 为自变量, 回归拟合、建立土壤水分预报方程(模型), 以指导苹果园节水灌溉, 具有更科学的理论基础且操作简便。本研究以 2003 年及 2004 年数据为样本, ΔT 和 RAW 回归曲线趋势如图 2 所示, 拟合方程如下

$$RAW = 0.278 - 0.076\Delta T \quad (4)$$

式中 RAW —— 土壤相对有效含水率, 无量纲参数。 RAW 与 ΔT 的相关系数 $r = -0.819$, $F = 99.837 > (F_{0.01}^{1,49} = 4.035)$, 通过 0.01 水平显著性检验。可见, 基于 ΔT 地土壤水分预报模型具有一定的模拟精度。

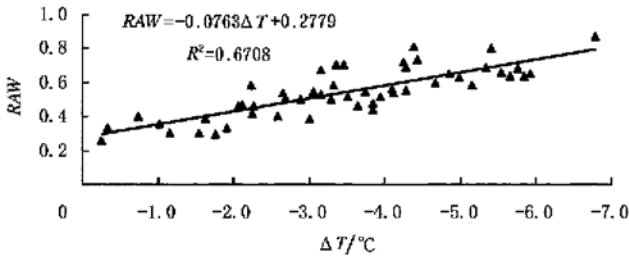


图2 苹果树冠气温差 (ΔT) 与土壤相对有效含水率 (RAW) 间的关系趋势

Fig. 2 Relationship between soil relative available water content (RAW) and canopy-air temperature differential (ΔT) of apple trees

2.2 土壤水分预测模型的验证

为检验模型(4)的可靠性, 本研究采用 2002 年及 2005 年的 40 对观测数据进行验证, 结果表明: 根层 0~80 cm 土壤相对有效含水率模拟值 (SV) 与实测值 (MV) 吻合效果较好 (图 3), 相关系数 r 可达 0.9137 ($n = 40$), 在 0.01 水平上通过显著性检验。 SV 和 MV 的线性相关方程为

$$SV = 0.7334MV + 0.1470 \quad (5)$$

可见, 以 ΔT 为自变量、以 RAW 为因变量的土壤水分预测模型具有较好的模拟精度。

模拟值与实测值之间的平均相对误差为 12.87%, 最小与最大相对误差分别为 0.1%、34.6%。误差存在的主要原因在于: ①所建立的模型为经验模型, 本研究采用了 2002 年及 2005 年的观测数据来验证以 2003 年及 2004 年数据为基础的土壤水分预测模型, 而苹果存在大小年之分、不同年份间气候背景存在差异等因素在一定程度上会又影响到苹果树蒸腾耗水变化规律及其与苹果树自身因素(生理因素)、气象因素间的相关程度, 最终使得不同年份间生物及气象因素对根层土壤含水率的影响作用程度存在一定差异。②目前, 土壤含水率测定技术和手段还难以保证 100% 的准确率, 实测值本身就存在一定的误差。从图 3 还可知: 当土壤水分值较高及较低时, 模拟值与实测值间相对误差较大, 这就可能与本试验研究所采用的土壤水分测定仪在极端土壤水分状况时的分辨率、准确率有所降低有关系。

目前, 建立果园灌溉决策系统的关键技术之一就是需要及时了解土壤含水率。而鉴于果园土壤水分空间变

异性较大, 且目前国内外还没有能实时、有效、准确、经济、简单、方便地监测土壤水分的技术与方法, 故可以认为本文所建立土壤水分预测模型可以有效解决这一关键技术。

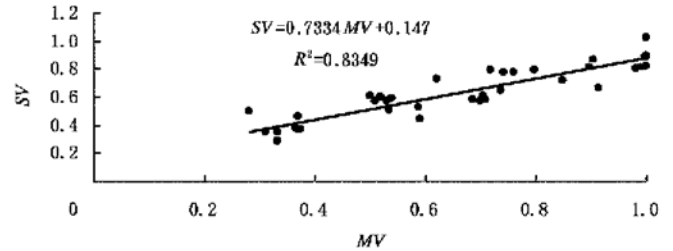


图3 土壤相对有效含水率 (RAW) 模拟值 (SV) 与实测值 (MV) 的比较

Fig. 3 Comparison between the calculated and the measured soil relative available water content (RAW)

3 结论与讨论

苹果树主要生长期, 以晴天 14:00 冠层叶气温差为自变量, 以根层土壤相对有效含水率为因变量的土壤水分预测模型具有较好的模拟精度。

目前, 建立果园灌溉决策系统的关键技术之一是要及时了解土壤水分状况。但国内外所有土壤水分测定技术与方法尚存在诸多局限性, 故可认为所建立土壤水分预测模型为解决这一问题提供一条途径。

为了利用冠层叶气温差判别果园土壤水分胁迫程度, 以制定适时灌溉决策制度, 在具体应用时, 根据需要灌溉的临界根区土壤相对有效含水率可计算出临界冠层叶气温差值, 然后将实测冠层叶气温差与计算的临界冠层叶气温差比较, 若前者小于后者就表明此时果园不需要灌溉, 反之需要灌溉。若将田间持水量作为灌溉定额的标准^[24, 25], 那么就可以根据该值与土壤容积含水率的差值而确定具体的灌溉量, 其中, 土壤容积含水率可利用本研究结果之一: 土壤容积含水率与冠层叶气温差的关系模型(式(2))推算得到。

冠层叶气温差测定技术和手段先进性、实用性和稳定性是所建模型在实际工作中得以应用、推广的关键。目前, 农业气象领域, 气温和冠层叶温测定技术和方法已比较成熟和稳定, 且中国果农可以承受气温测定仪器性价比, 即冠层叶气温差的测定一般不存在技术和成本问题。

[参 考 文 献]

- [1] 袁国富, 唐登银, 罗毅, 等. 基于冠层温度的作物缺水研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 16(1): 49-54.
- [2] Keener M E, Kircher P L. The use of canopy temperature as an indicator of drought stress in humid regions[J].

- Agricultural Meteorology, 1983, 28(4): 339– 349.
- [3] Reicosky D C, Smith R C G, Meyer W S. Foliage temperature as a means of detecting stress of cotton subjected to a short-term water-table gradient[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1985, 35(1– 4): 193– 203.
- [4] Azzam S, Tubaileh W. Sammis, et al. Utilization of thermal infrared thermometry for detection of water stress in spring barley[J]. Agricultural Water Management, 1986, 12(1, 2): 75– 85.
- [5] Khera K L, Sandhu B S. Canopy temperature of sugarcane as influenced by irrigation regime[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 37(3): 245– 258.
- [6] 蔡焕杰. 用冠层温度—气温差方法诊断作物水分状况[J]. 干旱地区农业研究, 1993, 13(3): 49– 54.
- [7] 段爱旺. 冠层温度在农田水管理中的应用及其相应的测定仪器[J]. 灌溉排水, 1995, 14(4): 53– 55.
- [8] 石培华, 梅旭荣, 冷石林, 等. 冠层温度与冬小麦农田生态系统水分状况的关系[J]. 应用生态学报, 1997, 8(3): 232– 234.
- [9] 康绍忠, 梁银丽, 蔡焕杰, 等. 干旱区水—土—作物关系及其最优调控原理[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [10] Mahan J R, Burke J J, Upchurch D R, et al. Irrigation scheduling using biologically-based optimal temperature and continuous monitoring of canopy temperature[J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(1): 375– 381.
- [11] 梁银丽, 张成娥. 冠层温度—气温差与作物水分亏缺关系的研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 24– 26.
- [12] 刘恩民, 于强, 谢贤群. 水分亏缺对冬小麦冠层温度的影响研究[J]. 生态农业研究, 2000, 8(1): 21– 23.
- [13] 杨晓光, 于沪宁. 冬小麦、夏玉米水分胁迫监测系统[J]. 中国生态农业学报, 2000, 8(1): 27– 29.
- [14] 赵晨, 罗毅, 袁国富, 等. 作物水分胁迫指数与土壤含水量关系探讨[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 34– 36.
- [15] Tupe A R, Bote N L, Varshneya M C. Canopy temperature as an indicator for scheduling irrigation for brinjal[J]. Journal of Maharashtra Agricultural Universities, 2002, 27(1): 87– 90.
- [16] 刘海隆, 杨晓光. 玉米水分胁迫判别指标的研究[J]. 中国农业气象, 2002, 23(3): 22– 26.
- [17] 王卫星, 罗锡文, 区颖刚, 等. 基于冠层温度的菜心缺水指数模型初步试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(5): 47– 50.
- [18] 刘云, 宇振荣, 孙丹峰, 等. 冬小麦遥感监测土壤含水量的试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 352– 356.
- [19] Boroomand-Nasab S, Kashkuli H A, Zadeh F R. Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference for sugarcane[J]. Crop Research (India), 2005, 30: 3, 355– 359.
- [20] Giuliani R, Flore J A. Potential use of infra-red thermometry for the detection of water stress in apple trees[J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(1): 383– 392.
- [21] Anconelli S, Battilani A, Ferreira M I, et al. Use of leaf temperature to evaluate grapevine (*Vitis vinifera*) yield and quality response to irrigations [J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(1): 407– 413.
- [22] Massai R, Remorini D, Casula F, et al. Leaf temperature measured on peach trees growing in different climatic and soil water conditions[J]. Acta Horticulturae, 2000, 537(1): 399– 406.
- [23] Remorini D, Massai R. Comparison of water status indicators for young peach trees[J]. Irrigation Science, 2003, 22(1): 39– 46.
- [24] 程纯枢, 冯秀藻, 刘明孝, 等. 中国农业百科全书—农业气象卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [25] 华孟, 王坚. 土壤物理学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993.

Model for predicting soil water status based on the canopy-air temperature differential in apple orchard

Zhang Jinsong, Meng Ping, Gao Jun, Wang Hesong, Chu Jianmin

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: This study was conducted to develop a model for predicting soil water status in the apple orchard based on canopy-air temperature differential (ΔT) at 14:00 o'clock in the fine days during the growing season in combination of observed air temperature and relative available soil water content in 0~80 cm soil layer in 2003~2004. Relative available water content (RAW) in 0~80 cm depth layer was chosen as the index of soil water status. The experiment was carried out in the hilly land of North China from 2002 to 2005. The results showed that: RAW and ΔT were significantly correlated ($r = -0.819$, $n = 50$), according to the data in 2003~2004, and were tested with the measured data in 2002 and 2005, indicating that the measured RAW was highly correlated with the simulated data ($r = 0.9137$, $n = 40$). Thus, the model can provide a valuable tool for diagnosing soil water status for apple trees. Based on this model, the critical ΔT could be calculated according to the critical RAW, and if the measured ΔT is larger than the critical ΔT , irrigation should be carried out in the orchard.

Key words: apple orchard; canopy-air temperature differential; soil water