

精量灌溉决策定量指标研究现状与进展

蔡甲冰^{1,2}, 刘 钰¹, 雷廷武², 许 迪¹

(1. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100044; 2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:按照土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 理论, 灌溉决策的指标可分为三类: 土壤水分、作物水分生理状况和气象因素。对这三方面的研究现状与进展作了详细的阐述。在土壤水分监测技术方面, 时域反射仪 (TDR) 技术、微波技术、近红外辐射等的应用, 使监测更加准确和便利; 用于灌溉决策的作物水分生理信息监测包括: 细胞液浓度、叶/水势、茎果微变化、生理电阻电容、声发射等, 从目前国际上研究情况来看, 叶冠层温度和茎流变化是指示作物水分状况较好的指标; 在估算大气蒸发力方面, 以参考作物蒸散量为指标, 估计作物参考蒸散量的方法以联合国粮农组织 (FAO) 最新推荐的 Penman-Monteith 方法较为精细。并对目前灌溉决策指标的综合运用情况进行了总结。讨论了作为精准农业重要组成部分的“精量控制灌溉”今后的发展方向, 建议以通过对作物、土壤、气象复合系统的分析和判断, 指导灌溉的适时和适量。

关 键 词: 精量灌溉; 灌溉决策; 指标; 土壤墒情; 蒸腾蒸发量

中图分类号: S272.4; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2004)04-0531-07

在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中, 用于灌溉决策的定量指标有 3 种: ①根据农田土壤水分状况确定灌溉时间和水量, 考虑的因素包括不同作物适宜水分上下限、不同土壤条件、土壤水量平衡方程及参数选择等; ②根据作物对水分亏缺的生理反应信息确定是否需要灌溉, 指标包括作物冠层温度相对环境温度的变化、茎果缩涨微变化、茎/叶水势、茎流变化等; ③根据作物生长的小环境气象因素的变化确定灌溉的时间和作物的需水量, 通过气象因素确定作物的蒸腾蒸发量来进行灌溉决策。随着科技进步和计算机等科研辅助工具的普及, 人们对 SPAC 中三要素的研究愈来愈深入。就这 3 方面的研究现状及指标的综合运用进展分述如下:

1 土壤水分状况

土壤水分运移规律的研究在近 20 年来发展迅速。在农田水分的管理及灌溉决策中, 人们更关心的是土壤水分状况与作物的关系。能够获得合理及时的土壤墒情信息, 对提高灌溉的准确性和有效性十分重要。

1.1 墒情监测

确定土壤含水量最基本的方法是取土样烘干法, 它的缺点是土层受到扰动, 且不能连续观测。因此不能用于灌溉控制。间接测土壤水分状况的方法有中子散射法、X 射线或 γ 射线衰减法等, 这些测量方法比较准确, 也不破坏土壤结构, 但对不同的土壤需要率定, 并且使用中要注意避免其对人体的辐射伤害。

1975 年 Davis 和 Chudobiak 将时域反射仪应用于土壤水分测量后^[1], TDR 从 20 世纪 80 年代以来得到了不断改进和广泛应用^[1]。其突出优点是可自动、快速、多方位的连续监测土壤水分, 且不需要特殊的标定。目前应用 TDR 技术研制的 TDR 系统有加拿大的 Moisture Point 和 TRASE 系统, 德国的 TRIME, 英国 Delta-T 公司的 Theta Probe 等^[2]。

和 TDR 类似的频域反射仪, 是利用无线电频率电容技术来测量土壤含水量。这种技术实际测的是土壤电容, 其原理是将一对电极 (高频晶体震荡器) 插入土中, 电极之间土壤形成一个电容电路; 当高频无线电波 (约 150 MHz) 在电容电路中形成脉冲时, 由土壤本身电容就可以产生一个共振频率。利用两电极间土壤电容与土壤

收稿日期: 2003-03-06; 修订日期: 2003-06-10

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目 (2001AA242062-03)

作者简介: 蔡甲冰 (1976 -), 女, 河南南阳人, 工程师, 博士研究生, 主要从事作物需水量和灌溉制度及精量控制灌溉方面的研究。E-mail: caijb @iwhr.com

含水量的率定关系确定土壤含水量。Thomas W Ley 等曾对土壤水分的测量及各种测量工具使用进行过详细的对比研究^[3]。

为便捷地了解农田水分状况提高灌溉管理水平, 1997 年 ASAE 曾经开发一种灌溉警示装置^[4], 它利用电子学原理把张力计的负压值转换为电信号, 当土壤水分张力达到设置值时系统给出指示。在此基础上, B A King 等开发并应用了可视化土壤水分状况指示器远距离实时监测土壤水分状况。其控制面板上用白、蓝、橙 3 种颜色表示当前含水率值处于设定值上、中、下 3 种状态, 并在土壤含水率到达警戒线时指示需要灌溉。经过 7 块西红柿地和对比性试验地的试验研究, 配有 VSWI 的田块要少用 7 % (29 mm) 的灌溉水, 能达到省水的目的。

随人们对电磁波认识的深入, 现代电子技术又为其提供了强有力的技术支持, 因此电磁方法也是目前研究最多、最深入, 并且最具潜力的一类方法。基于广义电磁波与土壤相互作用的原理实现土壤含水量测定的方法, 可以概括为广义电磁方法, 如上面提到的 TDR 技术、射线方法, 以及近红外辐射 (Near Infra-red Radiation, NIR), 微波 (Microwave), 以及适于大区域应用的各种遥感法等。从物理机理上看, 现有各种电磁测量方法, 尽管其依据的原理互不相同, 但都是根据电磁波与土壤相互作用来实现的, 在这一点上其总原理是统一的^[6]。

因为田间土壤的复杂性和变异性, 所有方法在测量田间土壤含水量时都不可避免的会产生一定的误差。误差的产生既有仪器和操作方面的原因, 也有测定方法本身的原因。对于前者, 可通过设备和技术改进予以减小或消除, 而对于后者, 明显的改善是非常困难的。因此研究土壤特性的空间变异性, 并用于确定田间土壤墒情监测的合理测点数目和位置, 对提高灌溉决策精确度具有重要意义。杨诗秀、雷志栋^[7]就田间土壤含水率的空间结构及取样数目的确定进行了研究。李毅、刘建军^[8]从研究方法和内容上对土壤水分空间变异性的研究作了阐述, 总结出当今土壤水分空间变异性的研究方法主要有: 传统的统计方法、时间序列分析方法、地质统计学方法、随机模拟方法、分数维方法以及应用地理信息系统研究空间变异的方法。

1.2 墒情预报

墒情预报是对作物根系层土壤水分增长和消退过程进行预报, 是进行适时适量灌水的基础。常用的土壤墒情模拟和预报方法有经验公式法、土层水量平衡法、土壤水动力学法、大孔流法、消退系数法。目前国内用于土壤墒情预报的模型主要有经验模型、概念性模型、机理模型、随机模型及 BP 神经网络模型^[9~13]。

需要特别指出的是, 这些研究都是以点预报为主, 缺乏较大尺度的区域和宏观预报方法。近年来已逐步成熟的分形理论和多因素场预报理论为这一问题的解决提供了理论基础。特别是需要将区域土壤水分的监测与预报有机结合起来, 利用监测结果校正预报的误差累积, 同时利用预报方法大幅度减小监测的频率与成本, 达到在保证精度的条件下降低成本的目标。

2 作物需水信息

灌溉的真正对象是作物而不是土壤, 而且作物的生长情况实际上能综合反映天气和土壤水分的变化情况, 故合理的灌溉应以作物的生长情况为主要依据。作物指标是指与作物生长密切相关的作物水分指标。由于作物生长状况是天气条件、土壤水分条件和作物病虫害等综合影响的结果, 理论上讲, 作物水分状况应从作物本身考虑, 而不需要土壤含水率、作物根系分布以及大气蒸发等的详细情况。作物的水分状况会在作物的生理过程和生长状况上直接反映出来。这种信息可以来自单个作物 (如叶水势、茎秆直径变差、茎流等), 但是必须有合理的空间分布性或者校正样本; 也可以整体考虑, 比如冠层温度或者辐射。

Tuener^[14]研究表明气孔阻力是测量作物水分状况的一个比较敏感的方法, 但是它对光照和叶-气水分差也敏感。因此很难用在有云天气的热带和亚热带地区。冠层温度也可以指示作物水分状况。但是冠层温度对风速和辐射条件敏感, 所以在风大或者天空有云的情况下, 致使气孔开合减少而使测量困难。叶片卷曲度适合用于指示水稻的水分状况。气孔阻力比较适合用于小麦和大豆, 冠层温度和叶片卷曲度是最适合于水稻的方法。

当作物受到水胁迫时发出悲鸣, 这种悲鸣的程度 (作物受水胁迫的程度) 可通过声波传感器检测得到。杨世凤等^[15]研究和开发了利用声波技术检测作物水胁迫信号、实施自动灌溉的系统。苏格兰爱丁堡的科学家利用

水母基因培育了一种基因改性土豆, 这种土豆在需要浇水时会发出荧光。当土豆植株内产生脱落酸时, 就会激发其发出荧光。土豆利用脱落酸对其体内细胞进行重新排列, 以便作好应付缺水的准备。爱丁堡大学的托尼·特雷瓦法斯教授在舍菲尔的科学节上说, 农民只要在每公顷的地里种上8棵这样的土豆, 就可以监测整块地的墒情^[16]。

从国外目前的研究结果看, 红外温度是个比较有前途的作物水分状况诊断信号。利用红外测温技术诊断作物缺水状况有着多方面的优势: 测定快速, 操作简便, 不干扰破坏样本, 可以连续自动监测。这种方法克服了以单叶片或单株作物为基本监测单元时取样误差大的弊端, 因此非常适用于大田作物。Tanner^[17]首先提出采用冠层温度指示作物水分状况, 并提出作物冠层温度是反映作物水分状况的一个良好指标。Monteith、Szeicz^[18]和Tanner首先使用红外测温仪来研究作物温度。Jackson等^[19]提出了作物水分胁迫指数(CWSI)的概念, 即由红外测温仪测得的冠层温度, 可根据能量平衡公式中干、湿气温及净辐射的估算来计算CWSI。此后许多学者并对不同作物进行了研究。

Ruzica Stricevic等^[20], 用作物本身来指示土壤水分胁迫, 对甜高粱的灌溉临界点进行了研究。Halim Orta等^[21]主要介绍了滴灌时用CWSI来确定西瓜的灌溉制度。他们所确定的西瓜产量与平均CWSI值之间的线性关系式为 ' $Y = 91.143 - 66.077 CWSI$ '。Abdulelah Al-Faraj等^[22]对高酥油草作物利用强光作物生长箱来研究土壤水分含量亏缺时作物水分胁迫指数及其基线。结果显示, 甚至是在较精细的可控制环境下, 作物水分胁迫基线也有很大不同。他们同时根据生长箱里的高酥油草数据, 开发了一个基于规则的模糊逻辑作物水分胁迫指数(FL-CWSI), 并用温室环境数据进行验证。FL-CWSI可以减少必须观测冠层阻力、空气动力学阻力、土壤热通量等工作, 就可以就3个输入项即可预测CWSI^[23]。

作物水分胁迫指数的应用主要依靠确定作物的无水分胁迫基线。Isabel Alves和Luis Santos Pereira^[24]提出了一个新的无水分胁迫基线定义, 它的理论基于易测量或估算的天气变量, 可在1d中的任一时间进行测量而不用管天气条件如何, 因此简化了灌溉的任务。无水分胁迫基线新定义公式为

$$T_s - T_w = \frac{V}{\Delta + \gamma \rho_a c_p} (R_n - G) \quad (1)$$

式中 T_s 为红外表面温度 ($T_s = T_{w, surf}$); T_w 为湿球温度; Δ 用 $(T_a + T_w)/2 \approx (T_c + T_s)/2$ 计算。

Ali Abdullah Alderfasi等^[25]通过对小麦的研究, 分析出作物冠层-大气温差 ($T_c - T_a$) 与大气饱和压差 $AVPD$ 之间相关关系为: $R^2 = 0.88$, $p = 0.0001$ 。这种相关关系可用来确定无胁迫基线公式和CWSI。Yazar等^[26]对低耗能精细应用LEPA灌溉玉米作物水分胁迫指数进行了估计, 所确定玉米无水分胁迫基线公式为 $T_c - T_a = 1.06 - 2.56VPD$ 。James等^[27]利用单层冠层温度能量平衡 (canopy temperature energy balance, CTEB) 模型确定每天ET的速率, 并应用其确定灌溉需水量 ("灌多少"), 作为用同样数据确定CWSI ("何时灌") 测量的辅助。

蔡焕杰、康绍忠^[28]通过甘肃民勤县的棉花试验田的田间试验, 研究了棉花冠层温度的变化规律。蔡焕杰等^[29]对覆膜棉花和玉米的研究表明: CWSI能够指示作物根系层的水分状况, 而 ($T_c - T_a$) 受环境因素 (太阳辐射、空气饱和差) 的影响较大。另外, 对标准化的冠层-空气温差法NDT定量诊断作物水分状况的可行性进行了研究。结果表明该法在很大程度上能消除环境因素的影响, 直接指示作物根系层的水分状况, 并提出了覆膜棉花和玉米各生育阶段需灌溉的临界CWSI及NDT值。

蒸腾速率是反映作物需水状况的一个基本信息。在作物蒸腾过程中, 茎杆中的液体一直处于流动状态。茎杆液流速度与蒸腾速率、植株需水之间有着十分密切的关系。植物蒸腾量的热学测定法可分为热脉冲法、热平衡法和热扩散法3类。后两者是根据植株茎杆或根部液流的热传输特性与液流速率之间的定量关系来推求植株的蒸腾速率和蒸腾量。这两种方法不受植株液流方向及其分布形式的影响, 有利于提高蒸腾总量的测定精度, 但对加热源和检测器精度的要求很高, 仪器也复杂, 操作不当易引起较大误差。热脉冲法则是根据植株茎杆或根部液流运动对热脉冲信号的传输速率来测定蒸腾量。这种测定方法要求必须搞清楚植株的液流分布特征, 才能综合确定出植株的蒸腾量。它对加热器和检测器的精度要求相对较低, 测量的精度和分辨率也较高。因此,

国内外在利用热学法测量植株茎秆液流运动时, 选择用热脉冲法的较多。

最早将热脉冲方法用于树木上是 Huber 和 Schmidt。此后有许多学者试图将其用于棉花作物的研究中^[30~32]。相关研究较多的学者还有 Cohen。他对在确定树木茎流的热脉冲方法上进行了改进, 为最小化测量误差, 探针间距选用 15 mm 为宜。利用改进的热脉冲方法, Cohen 曾经对道格拉斯冷杉的茎流, 和棉花吸水情况, 向日葵和玉米等进行了研究, 认为这是一个测定作物吸水情况比较合适的方法^[33~36]。

在开展茎流情况研究时, 对象一般选择茎干较粗壮的作物。如对苹果树, Green 等^[37]用热脉冲技术监测一个有着 14 年树龄的苹果树, 监测部位是茎干、两块根区。目的是确定一个苹果树在局部土壤水分含量发生变化时, 根区吸水模式有何反映。对橄榄树, Fernandez 等^[38]共开展了 4 个试验, 通过监测橄榄树的茎流来诊断水分胁迫, 以此建立了一个自动灌溉系统; Palomo 等^[39]对橄榄树开展 3 种水分处理, 即每天灌溉、生长季节灌溉 3 次和雨养, 并监测其茎流以估算腾发量来确定水分消耗量; Pasquale Gorio 等^[40]考虑到用补偿式热脉冲速度技术来估算茎流会受到茎干木质部水动力特性的影响, 建立了用一个 CHPV 计的监测结果来代替整块地植株茎流情况的系统。其它如对白杨树, Wiltshire 等^[41]用茎流计来估算幼白杨的用水量, 并研究了茎干收缩对其的影响; 对海枣树和杏树, Mohamed Habib Sellami 等^[42]连续观测了海枣树和杏树的茎流, 建立了蒸腾量和太阳总辐射与净辐射之间的关系。

Yunusa 等^[43]在温室和田间两种状况下, 利用热脉冲技术, 对无嫁接的葡萄藤监测由蒸腾转化而来的茎流速度。发现: 由热脉冲速度 THP 推导的每天蒸腾量, 与温室中直接重量法得到的和田间条件时由彭曼-蒙特斯方法推出的每天蒸腾量, 有明显的一致性。

国内在植株生理监测及茎流测定方面开展较早较多的是西北农林科技大学节水试验站, Shaozhong Kang 等^[44]在进行控制根系交替灌溉研究中, 曾经研究了苹果树和桃树的根区和茎干的茎流与参照腾发量及土壤含水量的关系。其它如谢华、沈荣开^[45]通过田间试验和理论计算, 用茎流计研究了冬小麦的蒸腾规律。彭致功等^[46]系统地研究了日光温室内茄子的茎流变化规律及其与环境因子之间的关系。

从以上多位学者的研究来看, 对作物水分信息诊断的研究(尤其是在冠层温度和作物茎流方面), 人们多是关注于一个方面进行作物水分研究和干旱诊断, 对于将两者结合的研究, 未见有报道。

对作物生长状态监测, 一般用植物光合测定系统、叶面积仪、叶面蒸发仪、茎流计、红外测温仪等来进行。目前的难点是, 由于仪器量测目标具有个体性和空间变异性, 使数据采集尚未真正实现自动监测和实时采集, 需要人工完成。这就使在实时灌溉系统中进行决策时产生一定滞后性, 在实际应用需加以考虑。

3 蒸腾蒸发量

蒸腾蒸发量的气象学指标主要是根据蒸发量(或蒸腾蒸发量), 或者某段时间的降水量来估算作物是否缺水。在土壤-植物-大气连续体的研究中, 参照作物腾发量(ET_0)是确定气象因素对该体系中水分传输与水汽扩散速率影响的指标。计算和确定参照腾发量一般有 3 种方法, 即土壤水量平衡法、能量平衡法和综合法。计算潜在腾发量的各种方法所需的气象和作物数据见表 1。

表 1 不同方法计算潜在腾发量所需气象、作物数据

Table 1 Weather and crop data for computation of evapotranspiration with different methods

方 法	降水	气温	太阳辐射	相对湿度	风速	空气动力学阻力	基本冠层阻力
Blaney and Criddle		+					
Jensen and Haise		+	+				
Turc	+	+	+				
Penman		+	+	+	+	+	
Penman-Monteith		+	+	+	+	+	+

可见, 随着科学的发展, 实验手段的进步, 计算方法所考虑的因素越来越多, 那么所计算的腾发量值就会越来越精确。尤其是从 Penman 公式到 Penman-Monteith 公式, 加入了基本冠层阻力后, 考虑了生物学因素, 就

更全面、细致了。下式为 Penman-Monteith 方程, 其中前一部分是辐射项, 后一部分是空气动力学项:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_1)} \quad (2)$$

式中 R_n 为冠层净入射辐射; G 为土壤热惯量; γ 为湿度计常数; T 为空气温度, $^{\circ}\text{C}$; e_s 为饱和水汽压; e_a 为实际水汽压; Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率; u_2 为 2 m 高度处的风速, m/s 。

随着气象站的自动化程度提高, 以及计算公式的不断修正, 以小的时间步长计算腾发量已成为可能。一个典型的自动气象站常用专用传感器观测下列气象因素: ①太阳辐射, 用日射强度计; ②气温, 用热电偶; ③相对湿度, 用薄膜电容器; ④风速, 用风杯风速计; ⑤风向, 用电位计风向标; ⑥降水, 用翻斗式雨量计。传感器的输出按一定时间间隔存入数据存储/采集器, 然后自动通过电话线和调制解调器传送到处理数据的中央控制微机。为了数据的可靠, 气象站的运行和设备维修是有严格要求的。数据代表性良好与气象站位置选择或环境也有很大关系。对于如何正确选择气象站方位及排列, 一些学者已作了许多研究。

4 灌溉决策指标的综合运用

现代农田水分循环研究是以连续的、系统的、动态的观点和定量的方法为基础, 即把土壤、植物、大气作为一个有机整体, 研究田间水分的微循环过程和规律, 以及与农田能量平衡和转化间的关系, 揭示田间水循环过程的各个方面, 探讨以土壤水和作物关系为中心、并考虑周围大气环境的农田水分调控机理^[47]。从以上多位学者的研究来看, 在对作物水分信息诊断的研究上(尤其是在冠层温度和作物茎流方面), 人们多是关注于一个方面进行作物水分研究和干旱诊断, 对于将两者结合研究上, 未见有报道。在灌溉决策指标上, 多数只是考虑了土壤-植物-大气系统三者中的某一个因素或某两个因素。

如 IRRIWAT^[48], 考虑了土壤水分亏缺和作物根系发展两个因素; 实时灌溉管理及气象预测工具 EPIC-PHASE^[49], 考虑了不同生育阶段缺水的产量效应。国内如霍泉灌区灌溉用水决策支持系统 HQIWADSS^[50], 旱地作物需水量预报决策辅助系统^[51]等也只是根据土壤水分状况来进行灌溉预报和决策。茆智等^[52]提出了根据天气类型、作物绿叶覆盖率和土壤有效含水率 3 项因素进行作物需水量实时预报的方法和模型。但测定绿叶覆盖率很难实现自动和连续观测。

有专家分析精量控制灌溉技术发展趋势时预言, 未来的灌溉系统将完全由计算机根据湿度传感器的测量数据而自动控制运行。支持农田信息实时采集的各种传感技术和传输技术也日趋完善。精量灌溉作为精准农业的重要组成部分, 已成为灌溉科学的热点和新的农业科技革命的重要内容。精量灌溉不仅是保证作物生育需水、获得优质、高产的重要手段, 而且是提高肥效和药效、减少环境污染的重要措施。此外, 精量控制灌溉也是一项十分有效的节水技术, 开展这方面的科研和技术开发工作对于发展我国的节水农业体系, 促进有限水资源的高效利用都具有重要的意义。因而, 在灌溉决策中对作物、土壤、气象复合系统作出综合性的分析和判断, 将是今后灌溉管理工作中的难点和新点。

参考文献:

- [1] Davis J L, Chudobiak W J. In situ meter for measuring relative permittivity of soil[J]. Geol Surv Can, 1975, Part A: 1 - 79.
- [2] Noborio K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31:213 - 237.
- [3] Thomas W L, Robert G S, Richard R T, et al. Soil water monitoring & measurement[M]. Washington: A Pacific Northwest Publication, 1994.
- [4] ASAE. Mousetrap key component in irrigation alert system[J]. Resource, 1997, 4(7):5.
- [5] King B A, Wall R W, Taberna J P, et al. Soil water status indicator for improved irrigation management[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 32:31 - 43.
- [6] 西北农业大学农业水土工程研究所, 农业部农业水土工程重点开放实验室. 西北地区农业节水与水资源持续利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.

- [7] 杨诗秀, 雷志栋. 田间土壤含水率的空间结构及取样数目确定[J]. 地理学报, 1993, 48(5): 447 - 456.
- [8] 李 毅, 刘建军. 土壤空间变异性研究方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2000, 4(4): 331 - 337.
- [9] 尚松浩, 雷志栋, 杨诗秀, 等. 冬小麦田间墒情预报的经验模型[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 31 - 33.
- [10] 蒋洪庚, 夏自强, 陈海芳, 等. 概念性土壤墒情模型在霍泉灌区的应用研究[J]. 水文, 1999(6): 12 - 16.
- [11] 康绍忠, 张富仓, 梁银丽, 等. 玉米生长条件下农田土壤水分动态预报方法的研究[J]. 生态学报, 1997, 17(3): 245 - 251.
- [12] 罗 毅, 雷志栋, 杨诗秀, 等. 一个预测作物根系层储水量动态变化的概念性随机模型[J]. 水利学报, 2000(8): 80 - 83.
- [13] 尚松浩, 毛晓敏, 雷志栋, 等. 冬小麦田间墒情预报的 BP 神经网络模型[J]. 水利学报, 2002(4): 60 - 64.
- [14] Tuener N C. Plant water relations and irrigation management[J]. Agricultural Water Management, 1990(17): 1 - 3, 59 - 73.
- [15] 杨世凤, 钱东平, 霍晓静, 等. 作物水胁迫声发射检及视情灌溉系统的研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 150 - 152.
- [16] 新华社参考新闻编辑部. 世界最新科技[M]. 北京: 光明日报出版社, 2000.
- [17] Tanner C B. Plant temperatures[J]. Agron J, 1963, 55: 210 - 211.
- [18] Monteith J L, Szeicz G. Radiative temperature in the heat balance of nature surface[J]. Q J R Meteorol Soc, 1962, 88: 496 - 501.
- [19] 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.
- [20] Ruzica Stricevic, Endre Caki. Relationship between available soil water and indicators of plant water status of sweet sorghum to be applied in irrigation scheduling[J]. Irrigation Science, 1997, 18: 17 - 21.
- [21] Orta A Halim, Yesim Erdem, Tolga Erdem. Crop water stress index for watermelon[J]. Scientia Horticulturae, 2003, 98: 121 - 130.
- [22] Abdulelah Al-Faraj, George E Meyer, Garald L Horst. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making-a traditional method[J]. J Computers and electronics in agriculture, 2001, 32: 107 - 124.
- [23] Abdulelah Al-Faraj, George E Meyer, Garald L. Horst. A crop water stress index for tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) irrigation decision-making-a fuzzy logic method[J]. J Computers and electronics in agriculture, 2001, 32: 69 - 84.
- [24] Isabel Alves, Luis Santos Pereira. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: a new approach[J]. Irrigation science, 2000, 19: 101 - 106.
- [25] Ali Abdullah Alderfasi, David C Nielsen. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47: 69 - 75.
- [26] Yazar A, Howell T A, Dusek D A, *et al.* Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn[J]. Irrigation science, 1999, 18: 171 - 180.
- [27] James F, Kjelgaard, Claudio O, *et al.* Evans. Accuracy of canopy temperature energy balance for determining daily evapotranspiration[J]. Irrigation science, 1996, 16: 149 - 157.
- [28] 蔡焕杰, 康绍忠. 棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究[J]. 灌溉排水, 1997, 16(1): 1 - 5.
- [29] 蔡焕杰, 张振华, 柴红敏. 冠层温度定量诊断覆膜作物水分状况试验研究[J]. 灌溉排水, 2001, 20(1): 1 - 4.
- [30] Bloodworth M E, Page J B, Cowley W R. A thermoelectric method for determining the rate of water movement in plants[J]. Soil Sci Soc Am Proc 1955, 19: 411 - 414.
- [31] Closs R L. The heat pulse method for measuring rate of sap flow in a plant stem[J]. N Z J Sci, 1958(1): 281 - 288.
- [32] Stone J F, Shirazi G A. On the heat-pulse method for measurement of apparent sap velocity in stems[J]. Planta, 1975, 122: 169 - 177.
- [33] Cohen Y, Kelliher F M, Fuchs M, *et al.* Determining of sap flow in Douglas-fir trees using the heat pulse technique[J]. Can J For Res, 1985, 15: 422 - 428.
- [34] Cohen Y, Li Y. Validating sap flow measurement in field-grown sunflower and corn[J]. Journal of experimental botany, 1996, 47: 1699 - 1707.
- [35] Cohen Y, Fuchs M, Green G C. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees[J]. Plant, Cell and Environment, 1981(4): 391 - 397.
- [36] Cohen Y, Fuchs M, Mcleod D J, *et al.* Calibrated heat pulse method for determining water uptake in cotton[J]. Agronomy Journal, 1988, 80(3): 398 - 402.
- [37] Green S R, Clothier B E, *et al.* The response of sap flow in apple roots to localised irrigation[J]. Agricultural water management, 1997, 33: 63 - 78.

- [38] Fernandez J E, Palomo M J, Diaz-Espejo A, *et al.* Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress[J]. *Agricultural water management*, 2001, 51: 99 - 123.
- [39] Palomo M J, Moreno F, Fernandez J E, *et al.* Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 55:15 - 35.
- [40] Pasquale Gorio, Giovanni Gorio. Sap flow of several olive trees estimated with the heat-pulse technique by continuous monitoring of a single gauge[J]. *Environmental and experimental botany*, 2003, 49: 9 - 20.
- [41] Wiltshire J J J, Wright C J, Colls J J, *et al.* Effects of heat balance stem-flow gauges and associated silicone compound on ash trees[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1995, 73(34): 135 - 142.
- [42] Mohamed Habib Sellami, Mohamed Salah Sifaoui. Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59:191 - 204.
- [43] Yunusa I A M, Walker R R, Loveys B R, *et al.* Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat - pulse technique with gravimetric and micrometeorological methods[J]. *Irrigation science*, 2000, 20: 1 - 8.
- [44] Shaozhong Kang, Xiaotao Hu, Peter Jerie, *et al.* The effects of partial rootzone drying on root, trunk sap flow and water balance in an irrigated pear (*Pyrus communis* L.) orchard[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 280: 192 - 206.
- [45] 谢 华, 沈荣开. 用茎流计研究冬小麦蒸腾规律[J]. *灌溉排水*, 2001, 20 (1): 5 - 9.
- [46] 彭致功, 段爱旺, 刘祖贵, 等. 日光温室条件下茄子植株蒸腾规律的研究[J]. *灌溉排水*, 2002, 21 (2): 47 - 50.
- [47] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章, 等. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1994.
- [48] Nimah M N, *et al.* IRRIWAT: a mathematical model and software for real-time irrigation scheduling[R]. International conference on Evapotranspiration and irrigation scheduling. Sun Antonio, Texas. November 3~6, 1996.
- [49] Cabelguenne M, Debaeke P H, Puech J, *et al.* Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecast[J]. *Agriculture Water Management*, 1997, 32:227 - 238.
- [50] 顾世祥, 李远华, 崔远来, 等. 灌溉管理应用软件的研究现状及前景[J]. *灌溉排水*, 1999, 18(1): 61 - 64.
- [51] 上官周平, 邵明安, 薛增召, 等. 旱地作物需水量预报决策辅助系统[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 42 - 46.
- [52] 茆 智, 李远华, 李会昌. 实时灌溉预报[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(5): 24 - 33.

Review of indices for precision irrigation decision-making

CAI Jia-bing^{1,2}, LIU Yu¹, LEI Ting-wu², XU Di¹

(1. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100044, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: According to the theory of soil-plant-atmosphere continuum, there are three types of indices for precision irrigation decision-making, including soil moisture, plant water status and weather conditions. This paper reviews the researches and developments in these regards. The technologies for soil water monitoring and measurement have lately made great progress, such as time domain reflectometry, microwave, near infra-red radiation, etc. The plant water status, indicated by the leaf temperature, shrinking or swelling of stems or fruits, the capacitance or resistance of crop stem, etc, has been used as indicators for irrigation decision-making. And the temperature difference between canopy and its ambience, including the sap flow of plant, will be a better method to study the crop water status from the literature reviews. The crop reference evapotranspiration, estimated from meteorological data with methods such as the Penman-Monteith method recommended by FAO, is useful for precision irrigation decision-making. And it is concluded that the combination of the applied multi-indices can be used for irrigation management. In this paper, the development of precision irrigation control, as an important part of precision agriculture, is also discussed. The factors, which should be considered for irrigation application at the “proper time” and “adequate quantity” for these purposes, are crop, soil moisture and weather conditions.

Key words: precision irrigation; irrigation decision-making; index; soil moisture; evapotranspiration