

基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统*

蔡甲冰^{1,2} 许迪^{1,2} 司南³ 魏征^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048; 3. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018)

摘要: 设计了一个可以在线连续监测田间作物冠层温度、环境信息和土壤墒情的实时灌溉决策系统,并将其安装于农田进行了1 a实际运行和观测。系统采用太阳能供电和微处理器进行数据采集和管理,为野外的实际应用提供了保障。系统配置了红外温度、空气温/湿度、土壤水分/水势等传感器,能够及时采集田间全面的同步数据,排除了异地观测所形成的数据误差。采用悬臂式多点采集下垫面红外温度检测方法,可以快速采集更多和更高精度的数据,避免单点测量的人为误差。系统配备的快速锁紧装置,能够根据下垫面作物的生长情况进行传感器位置高度调节,使检测数据更符合田间实际情况。通过运行管理和监测数据分析可见,所监测数据能够很精细的刻画田间作物实际生长状况,可以用于灌区综合灌溉决策,实现田间精量灌溉管理和控制,为灌溉管理的精量化和智能化提供数据支持。

关键词: 冠层温度 土壤墒情 空气温度 空气湿度 实时监测 灌溉决策

中图分类号: S274.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0133-07

Real-time Monitoring System of Crop Canopy Temperature and Soil Moisture for Irrigation Decision-making

Cai Jiabing^{1,2} Xu Di^{1,2} Si Nan³ Wei Zheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China

2. National Center for Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China

3. College of Water Resources & Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: The messages of crop water deficit, soil moisture and field meteorology are the fundamental data to meet the needs of water saving, good quality and high yield in modern field irrigation management. Above all, it is very important to obtain these data at the same step in real time. A field monitoring system in real-time was presented which could support the data of crop canopy temperature, environment message and soil moisture at 1 h interval. It was powered by solar panel and controlled with a microprocessor to manage the data collection and storage. The configured sensors included infrared temperature, air temperature and humidity, soil water content, soil water potential and temperature. The infrared temperature sensor was installed at the end of the cantilever arm fitted on the upright stainless steel rod. It had a 45° inclination angle of the cantilever arm to scan the temperature of underlying surface. Each time, it collected multiple spot at 36° interval above the crop canopy and went back to the original location. Therefore, the average value of the canopy temperature would be more precise than that of the single detection. The rapid locking device could adjust the cantilever arm and sensors to the suitable position following the stainless steel rod, according to the need in different crop growth seasons. After the analysis of the monitoring data, all of these could describe the refined crop actual circumstance in the field and they can be used in irrigation decision-making and irrigation management. Moreover, how to separate reasonably

收稿日期: 2015-09-20 修回日期: 2015-10-30

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD08B01、2012BAD08B04)、中国水利水电科学研究院“十二五”重点专项资助项目(节集1258)和留学人员择优资助项目(JS0135012014)

作者简介: 蔡甲冰,高级工程师,博士,主要从事节水灌溉技术与理论研究,E-mail: caijb@iwhr.com

the surface temperature occurred from infrared data scanned and determine the dependable threshold values of irrigation decision-making indexes, are the key points in the next step.

Key words: Canopy temperature Soil moisture Air temperature Air humidity Real-time monitoring
Irrigation decision-making

引言

随着水资源短缺和降雨空间分布不均的日益严重,以及劳动力成本的上升和生态环境压力的剧增,灌区农田灌溉和管理必须向集约化、自动化和精量化的方向发展,以可持续的发展方式以及人水和谐的生产方式为保障,实现节水型灌区的信息采集实时化、灌溉管理智能化、灌溉决策智慧化。作物冠层红外温度可以反映农田作物蒸腾蒸发情况和水分亏缺状况^[1],利用冠层-空气温度差(冠气温差, T_c-T_a)这一指标能够直观进行缺水诊断^[2]。利用作物冠层红外温度和土壤墒情进行综合灌溉决策,既能考虑作物对水分亏缺的直观反应,又能准确计算出补充灌溉量;是现代灌区灌溉管理中能够达到节水、精量的一个重要的简捷方便和实用的方法。

在实际观测中,田间作物冠层红外温度和环境参数往往是由手持红外探测仪、气象站、土壤水分传感器分别来获取的^[3-9]。由于田间观测手段的差异和不同步,可能造成数据采集不连续或因观测人员不同引起主观数据误差等问题,因此不能及时、准确地进行灌溉管理和数据处理。另外,有不少学者也研发了很多监测作物水分信息的观测系统,如基于无线传感网络声发射来检测作物水分胁迫^[10-12],基于茎直径变差来进行精量灌溉决策^[13-14]等。以上指标日内变幅非常大,在实际应用中可能会导致观测误差和系统误差,有较多人为因素对数据采集过程产生影响。

现代工业技术的高速发展,为农田试验观测提供了较高精度的测量设备和传感器,如医疗级的红外探头常温下的测量精度可以达到 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、时域反射仪 TDR 的土壤水分测量精度可达 1%。针对上述情况,借助已经发展成熟的、有较高测量精度的传感器,本文设计一种能够自动、连续采集田间作物冠层温度、环境信息和土壤墒情的监测系统,利用太阳能板供电和微处理器管理,实现基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策,为农田综合灌溉决策提供及时、准确的数据。

1 冠层温度和土壤墒情的实时监测系统设计

1.1 整体结构与工作流程

1.1.1 整体结构

考虑到农田土壤墒情和作物水分信息采集所用

传感器的功耗大小、监测系统的野外使用方便性、灵活性以及数据采集的准确性,本系统采用太阳能供电、微功耗处理器控制、监测部件快速升降装置和摇臂式多点数据采集的思路进行设计。

图 1 是本系统的整体结构示意图。可见,本系统主体结构采用一个不锈钢立杆固定在基座上,将太阳能电池板、冠层红外温度传感器、空气温/湿度传感器、供电设备箱和蓄电池箱固定;从底部处理器部分引出电缆,连接土壤水分、水势和温度传感器,将其分层埋设在立杆附近作物生长区域的土壤中。红外温度传感器安装在旋转臂上,可以通过电动空心旋转装置定时旋转、巡测,并且通过锁紧装置可以快速调节旋转臂高度,以适应下垫面作物的实际生长情况。

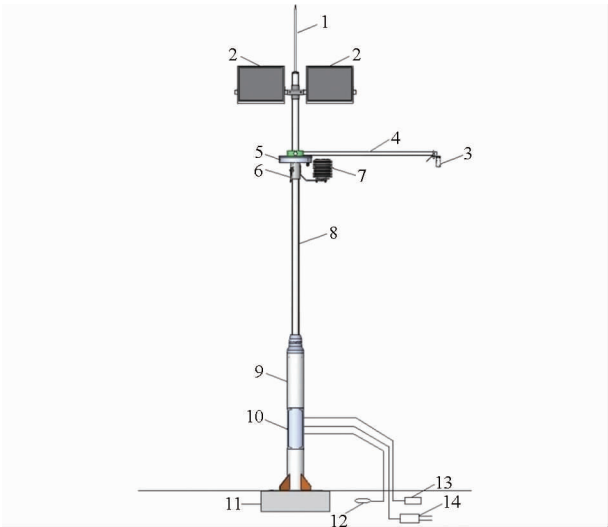


图 1 冠层温度和土壤墒情实时监测系统整体结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture

1. 避雷针 2. 太阳能板 3. 红外传感器 4. 旋转臂 5. 电动空心旋转装置 6. 锁紧装置 7. 空气温/湿度传感器 8. 不锈钢立杆 9. 防护机箱 10. 数据处理箱 11. 固定基座 12. 水势传感器 13. 温度传感器 14. 水分传感器

1.1.2 工作流程

图 2 是本系统功能结构流程图。如图中所示,整个系统包含 8 个部分,分别为电源管理单元 1、微处理器 2、多路复用开关 3、数据采集单元 4、模数转换器 5、数据存储单元 6、人机交互单元 7 和通信单元 8。其中,电源管理单元为微处理器和数据采集单元供电。微处理器通过多路复用开关与数据采集

单元连接,数据采集单元将采集到的作物冠层温度、空气温度和湿度以及土壤的水分、温度和水势等模拟信号通过多路复用开关传输至模数转换器;模数转换器将接收到的模拟信号转换成数字信号后传输至微处理器。微处理器将接收到的数字信号转换为带工程单位的数据后分别传输至数据存储单元和人

机交互单元进行存储和显示。通过人机交互单元向微处理器输入运行配置参数,微处理器的运行状态通过人机交互单元进行显示。微处理器控制数据存储单元将存储的带工程单位的数据通过通信单元传输至服务器(图中未示出),并通过通信单元接收服务器发出的测量控制信号。

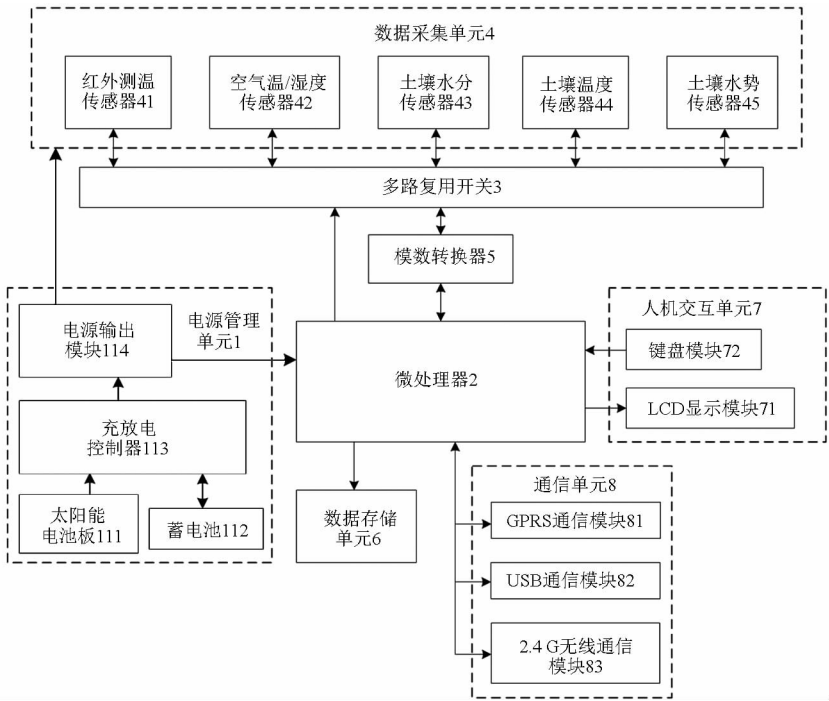


图 2 冠层温度和土壤墒情实时监测系统功能结构流程图

Fig. 2 Function flow chart of real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture

根据以上各个功能单元结构,作物冠层温度和土壤墒情数据监测系统实际工作流程为:①电源管理单元给微处理器供电后,微处理器首先对是否通过通信单元接收到服务器的测量控制信号进行判断;如接收到服务器的测量控制信号,则执行步骤②,否则,对是否定时控制数据采集单元采集相应信号进行判断。如果开始定时控制数据采集单元采集相应信号,则执行步骤②,否则,继续对是否通过通信单元接收到服务器的测量控制信号进行判断。②微处理器通过多路复用开关控制数据采集单元中红外测温传感器、空气温湿度传感器、土壤水分传感器、土壤温度传感器和土壤水势传感器,分别对作物冠层温度、空气温度和湿度以及土壤剖面的水分、温度和水势信号进行采集。③数据采集单元采集到的模拟信号通过多路复用开关传输至模数转换器后转换成数字信号,并传输至微处理器。微处理器将接收到的数字信号转换为带工程单位的数据后传输至数据存储单元进行存储,并通过通信单元传输至服务器。④微处理器进入低功耗模式,并控制数据采集单元停止采集相应信号。

1.2 旋转臂运行方法设计

本系统采用一种智能化的摇臂式多点作物冠层红外温度检测系统及检测方法,实现对作物冠层红外温度的监测,能够根据田间作物生长高度快速、自动地进行位置调节。图 3 是冠层温度和土壤墒情实时监测系统的旋转臂结构示意图。通过旋转臂转动红外传感器检测数据,系统能够检测的数据量更大、数据的准确度更高。从图 3 可见,锁紧机构与电动空芯旋转装置固定连接,电动空芯旋转装置通过锁紧机构设置于圆柱形立杆上,锁紧机构对电动空芯旋转装置起承载、固定作用。通过锁紧机构调节电动空芯旋转装置在圆柱形立杆上的位置。旋转式红外测温装置连接在电动空芯旋转装置上,通过电动空芯旋转装置调节旋转式红外测温装置在水平方向的旋转角度,旋转式红外测温装置对作物冠层温度进行检测,并将检测到的作物冠层温度信号传输至电动空芯旋转装置进行处理,电动空芯旋转装置将处理得到的作物冠层温度平均值传输至上位机(图中未示出)。

锁紧机构用于快速调节旋转臂的高度,以适应

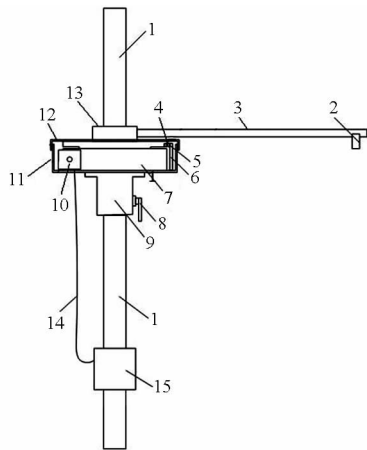


图3 冠层温度和土壤墒情实时监测系统的旋转臂结构示意图

Fig. 3 Rotating arm structure of real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture

1. 立杆 2. 红外传感器 3. 旋转臂 4. 转盘 5. 霍尔位置传感器 6. 电路板 7. 电动空芯旋转装置 8. 锁紧手柄 9. 锁紧机构 10. 步进电动机 11. 下防护壳 12. 上防护壳 13. 旋转连接头 14. 电缆线 15. 接线盒

下方作物生长高度。它包括一个空芯壳体、两压块、螺杆、锁紧手柄和弹簧。使用锁紧机构时,将空芯壳体活动套设在圆柱形立杆上。在空芯壳体凸出端内的两侧分别设置一压块,螺杆一端紧固连接在一压块上;螺杆另一端贯穿另一压块,并紧固连接位于空芯壳体凸出端外的锁紧手柄。弹簧套设在两压块之间的螺杆上。

旋转式红外测温装置包括旋转连接头、旋转臂和红外测温传感器。其中,旋转连接头与转盘固定连接,且与霍尔位置传感器处于同一竖直平面内,旋转臂通过旋转连接头与转盘连接,红外测温传感器设置在旋转臂末端,红外测温传感器将检测到的作物冠层的红外温度信号通过数据线传输至信号处理模块。转盘通过旋转连接头和旋转臂带动红外测温传感器在某一高度内的水平面上转动,完成对某一高度内作物冠层温度的检测。

1.3 数据处理与综合灌溉决策模块

作物冠层温度和土壤墒情监测系统将采集到的作物冠层温度、空气温度和湿度,以及包含土壤剖面水分、温度和水势信息的土壤墒情数据传输至服务器,经过模糊逻辑计算后可以用于田间作物精量灌溉决策。

1.3.1 数据采集与处理

数据采集包括3部分内容。

(1)作物冠层红外温度:红外测温传感器将采集到的 n 个点的作物冠层温度模拟信号依次通过多路复用开关和模数转换器转换成数字信号,并将数

字信号传输至微处理器进行处理。微处理器由预设程序自动剔除其中的最大值和最小值后,存储剩余 $n-2$ 个作物冠层温度数据和这 $n-2$ 个作物冠层温度数据的平均值,并将 $n-2$ 个作物冠层温度数据及其平均值同时传输至服务器进行处理。

(2)土壤水分信息:土壤水分、温度、水势传感器分别将采集的各层土壤剖面的含水率、温度和水势的模拟信号依次通过多路复用开关和模数转换器转换成数字信号,并将数字信号传输至微处理器进行处理。微处理器直接存储接收到的数字信号,并由预设程序计算土壤表层至根层1 m内的平均土壤含水率,计算结果传输至服务器。

(3)空气温/湿度:空气温/湿度传感器与红外测温传感器同步采集空气温度和湿度数据,并传输至微处理器进行存储,同时传输至服务器。

1.3.2 灌溉决策

根据所设传感器采集的作物冠层温度、空气温度和湿度以及土壤剖面的水分、温度和水势信息,服务器计算作物冠气温差和作物根层平均土壤含水率,然后参考文献[15-16]进行综合灌溉决策。其具体过程为:①通过调用MATLAB程序的Fuzzy Logic工具箱GUI(Graphical User Interface,图形用户接口),服务器根据预设模糊规则的*.fis文件对作物冠气温差和作物根层平均土壤含水率进行模糊计算。②根据所选择的作物类型、计算得到的作物冠气温差和根层土壤平均含水率以及预设的权重值,在服务器中唯一确定多指标模糊决策模型。③服务器根据多指标模糊决策模型对于干旱情况(湿润、轻旱、干旱)进行判断,并根据根层土壤平均含水率对所需灌水量进行计算,实现对目标区域的灌溉预报。

2 系统应用与数据分析

2.1 系统安装与应用

所研发的冠层温度和土壤墒情实时监测系统于2014年9月安装在国家节水灌溉北京工程技术研究中心大兴节水灌溉试验基地内,图4是本系统在玉米田和小麦田实际运行情况。其中,旋转臂在立杆上的位置,利用所设计的快速锁紧装置,根据下垫面作物生长高度实际情况进行了适应性调节。

系统自2014年安装以来运行状况良好,红外探头在横臂上以 45° 下倾角安装,每小时旋转一周并监测下垫面10个位置的作物冠层温度数据。旋转装置上同时装载空气温/湿度传感器,作物根区埋设4层土壤水分、温度和水势传感器,与冠层红外温度相同的时间间隔进行观测。所监测的数据存储在本地,可以利用无线或者有线的方式下载进入客户端

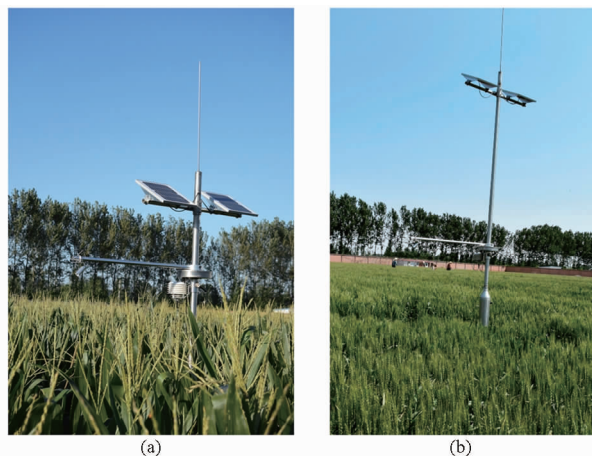


图 4 冠层温度和土壤墒情实时监测系统在田间的监测情况

Fig. 4 Field supervising circumstance of real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture

(a) 夏玉米种植区域 (b) 冬小麦种植区域

计算机,以进一步分析和处理。

2.2 监测数据分析

本系统当前运行期间设定监测时间间隔是 1 h,检测数据主要有作物冠层红外温度(每次旋转监测下垫面 10 个点数据进行平均)、空气温度、相对湿度,作物根区 20、30、40 cm 深度处的土壤含水率和土壤水势等。图 5 是系统运行期间冬小麦和夏玉米生育期内数据监测的部分处理结果,包括典型日内冠层温度和空气温/湿度变化、典型时段内(有降雨或者灌溉)作物冠层温度变化和对应土壤水分变化情况。

从作物冠层温度日变化图中(图 5a、5e)可见,夜晚空气温度高于作物冠层温度,在 07:00 左右二者交叉相等;随后冠层温度高于空气温度,在中午时达到日最高值,然后开始下降,至 16:00 左右二者又开始接近;冠层温度下降幅度较快,随后又低于空气温度。其中,在夏玉米日内变化图中,午间时段还可以观察到明显的双峰午休现象。07:00—16:00 是作物蒸散发较为强烈的时段,期间冬小麦冠层与空气温度差值要比夏玉米大得多。从当天土壤水分变化情况(图 5b、5f)可见,冬小麦田间土壤含水率要低于夏玉米,受到的土壤水分胁迫要大一些。日内空气相对湿度能够反映田间大气蒸发力,其变化与温度变化正好相反,与冠层温度和空气温度变化状况所指示的作物蒸散发情况一致。

在 2015 年 3 月 30 日—4 月 6 日时段内有少量降雨,并在 4 月 5 日进行了灌溉,时段内冬小麦土壤水分和水势图上能够清晰地反映出这些变化,有明显的拐点(图 5d)。因而反映在冠层温度和空气温/湿度图上,可以看到小雨时空气湿度加大,空气温度

要高于作物冠层温度,作物没有受旱,随后又恢复为白天空气温度低于作物冠层温度的状态。4 月 5 日下午进行灌溉后,二者很快就变为数值几乎相等的状态,处于不受旱的状态,但是白天蒸散发强烈时作物冠层温度又开始比空气温度要高,此时空气相对湿度很小,说明处于大气蒸发力时段(图 5c)。而此时单独观察土壤水分变化,仍然是高含水率、供水充分的情况。

夏玉米在 2015 年 9 月 4—8 日期间,因时有降雨,空气湿度较大,土壤供水充分,因此空气温度高于作物冠层温度,二者数值非常接近,作物蒸散发非常强烈(图 5g、5h)。此时的数据能够详细刻画土壤充分供水时作物需水信息、田间小气候变化情况,可以为作物生长和灌溉决策机理研究提供有力支撑。

因此,从以上数据分析来看,以土壤水分变化来判断农田旱情信息是不够的,其往往处于滞后状态;需要对田间作物、气象和土壤供水等信息进行综合判断,才能提供精确和合理的灌溉决策和管理。

2.3 实时灌溉决策

本系统所设计的灌溉决策模块基于实时采集数据计算作物冠层平均温度和根区土壤墒情,然后根据模糊逻辑算法确定干旱程度并提供所需灌水量。在 2015 年度的实际运行中,考虑到灌溉管理的方便,系统设计以每日 08:00 数据进行决策;从结果来看,这个决策时刻是否适宜需要商榷。因数据处理和下载的滞后原因,这里没能实时显示和应用。

因此,实时灌溉决策原则不仅要考虑作物种类对阈值的影响,还要考虑适宜的决策时段和时刻,才能达到灌溉管理中的合理应用。另外,设置并连接相应的轻便 LED 显示屏,及时显示和提醒决策结果,将能更好地达到本系统的便捷应用。这将是后续对系统的进一步优化和改进中重点加强研究的方向和内容。

3 结论

(1) 本系统能够准确、连续地采集作物冠层温度和土壤墒情数据;所搭载的空气温/湿度传感器,能够实时采集田间实际环境参数,从而进行相关计算,避免了异处气象站采集数值偏差引起的数据误差。

(2) 本系统能够对多点作物冠层的温度进行检测,完成一次检测任务时获取的数据量更大,检测的数据精度更高。

(3) 采用锁紧机构调节电动空芯旋转装置在圆柱形立杆上的位置,能够根据田间作物生长高度快速、自动地进行位置调节,因此在田间实际操作中能

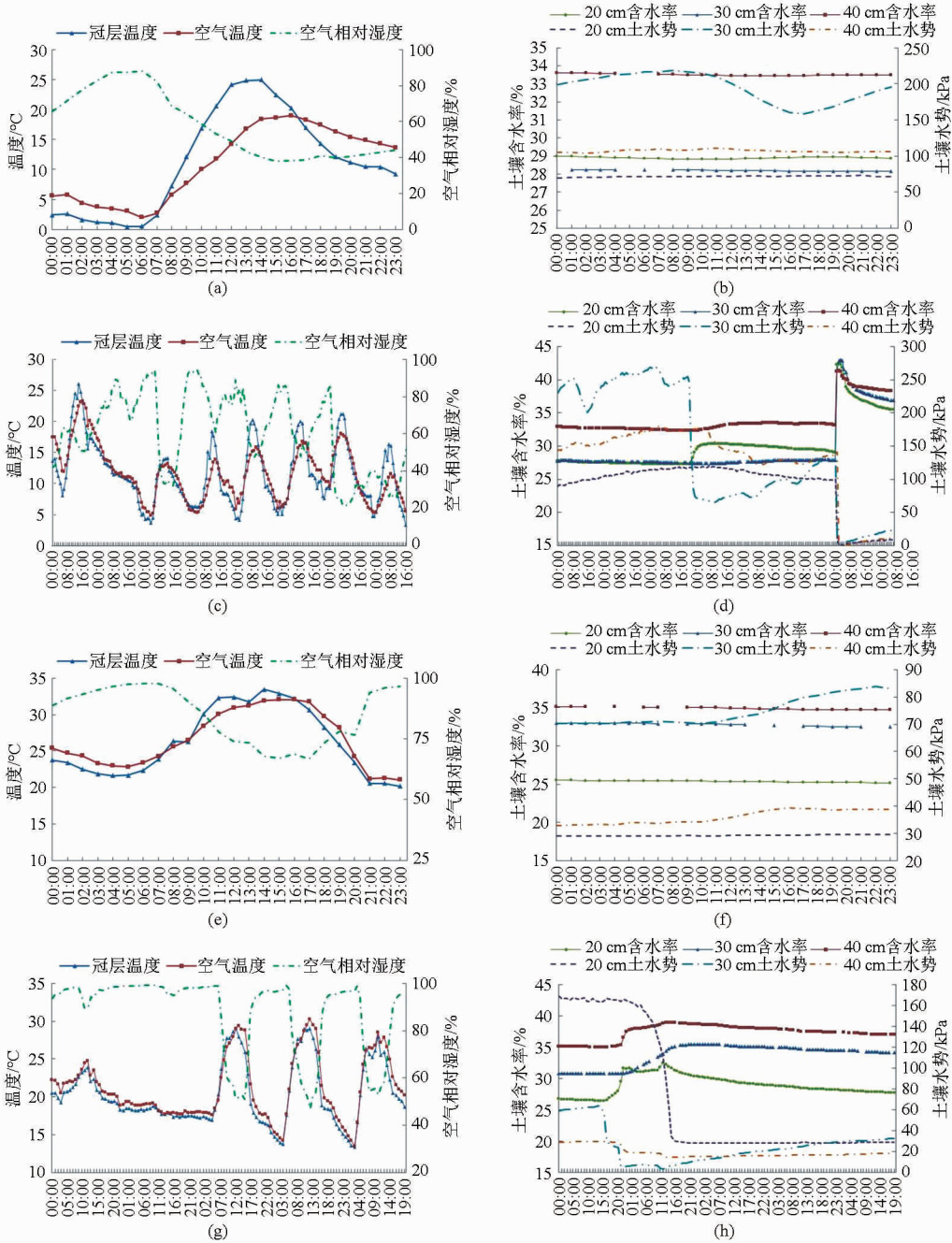


图5 系统田间监测数据结果分析

Fig.5 Monitoring data in growth season of winter wheat and summer maize
(a)、(b) 2015-03-25 冬小麦 (c)、(d) 2015-03-30—04-06 冬小麦
(e)、(f) 2015-08-07 夏玉米 (g)、(h) 2015-09-04—09-08 夏玉米

够大幅降低操作难度,方便使用和管理。

(4)采用太阳能电池板给系统供电,无需在田间布设电线,从而不影响耕作,能够适应缺乏电源供应的野外环境,为本系统大面积、远距离使用提供保障。

(5)本系统监测到的作物冠层温度、空气温/湿度以及土壤剖面的水分、温度和水势信息,可以全面、深入刻画田间作物生长情况和环境因素对其的影响,能够为作物精量灌溉决策和管理提供有力

支持。

(6)通过系统的运行和数据分析发现,确定作物精量灌溉决策指标阈值时,不能单独考虑一个因素的影响,要综合考虑和分析作物生长情况和环境,才能达到实时、适量、精确的要求。另外,摇臂式多点监测下垫面红外数据,对其中作物真实叶面温度和地表温度的自动区分,也是要进一步加强研究的难点。

参 考 文 献

- 1 Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water indicator [J]. *Water Resources Research*, 1981, 17(4):1133 – 1138.
- 2 Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, et al. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing Environment*, 1994, 49:246 – 263.
- 3 蔡甲冰,刘钰,李新,等. 在线式作物冠气温差监测与灌溉决策系统研制[J]. *中国农村水利水电*,2010(2):64 – 66.
Cai Jiabing, Liu Yu, Li Xin, et al. Online data collection system of crop infrared canopy temperature for irrigation control[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(2):64 – 66. (in Chinese)
- 4 Wanjura D F, Maas S J, Winslow J C, et al. Scanned and spot measured canopy temperatures of cotton and corn [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44: 33 – 48.
- 5 Sheng W, Sun Y, Schulze Lammers P, et al. Observing soil water dynamics under two field conditions by a novel sensor system [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1 – 2):555 – 560.
- 6 Blonquist Jr J M, Norman J M, Bugbee B. Automated measurement of canopy stomatal conductance based on infrared temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11):1931 – 1945.
- 7 Fisher D K, Kebede H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74:168 – 173.
- 8 Sun Y, Li L, Schulze Lammers P, et al. A solar-powered wireless cell for dynamically monitoring soil water content [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 69:19 – 23.
- 9 岳学军,刘永鑫,洪添胜,等. 基于土壤墒情的自动灌溉控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(增刊 2): 241 – 246, 250.
Yue Xuejun, Liu Yongxin, Hong Tiansheng, et al. Design and experiment of automatic irrigation control system based on soil moisture meter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (Supp. 2):241 – 246, 250. (in Chinese)
- 10 韩安太,何勇,陈志强,等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. *农业机械学报*,2011,42(9):173 – 180.
Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor network for tea plantation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42 (9):173 – 180. (in Chinese)
- 11 熊书明,王良民,王新胜,等. 作物精量灌溉系统的无线传感网络应用开发[J]. *农业工程学报*,2009,25(7):143 – 147.
Xiong Shuming, Wang Liangmin, Wang Xinsheng, et al. Development of wireless sensor networks in precision irrigation system for crop [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7):143 – 147. (in Chinese)
- 12 高峰,俞立,张文安,等. 基于作物水分胁迫声发射技术的无线传感器网络精量灌溉系统的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(1):60 – 63.
Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Preliminary study on precision irrigation system based on wireless sensor networks of acoustic emission technique for crop water stress[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1):60 – 63. (in Chinese)
- 13 高峰,俞立,张文安,等. 基于茎直径变化的无线传感器网络精量灌溉系统[J]. *农业工程学报*,2008,24(11):7 – 12.
Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Preliminary study on precision irrigation system based on wireless sensor networks for stem diameter microvariation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(11):7 – 12. (in Chinese)
- 14 蔡镔,李勉,邱秀荣,等. 基于茎直径微变化的 Zigbee 棉花精准灌溉监控系统的设计[J]. *河南农业大学学报*,2013,47(4): 430 – 435.
Cai Bin, Li Mian, Qiu Xiurong, et al. Design on cotton precision irrigation and monitoring system based on Zigbee wireless sensor networks for microvariation of stem diameter [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2013, 47(4):430 – 435. (in Chinese)
- 15 蔡甲冰. 参照腾发量实时预报与冬小麦多指标综合的精量灌溉决策研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
Cai Jiabing. Real-time predicting of ETo and irrigation decision-making with multi-indicator for precision irrigation: a case study with winter wheat [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 16 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56* [M]. Rome: FAO, 1998.