

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.045

基于土壤墒情的自动灌溉控制系统设计与试验*

岳学军 刘永鑫 洪添胜 王叶夫 全东平 陈柱良

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对传统山地果园灌溉中缺乏智能控制而费时、费力等缺点,为提高水资源利用率,设计了基于土壤墒情的自动灌溉控制系统,系统主要核心部件包括 S3C2440 芯片与 CC2530 射频芯片。该系统由太阳能充电锂电池后,再供电整个系统;结合 ZigBee 自行无线网络组网、自行愈合、低功耗和低成本特性;实时监测和记录土壤湿度信息,采集节点采集土壤湿度并经互联网上传服务器,自动控制系统依据土壤湿度自动调节灌溉量。试验结果表明,该系统运行稳定,丢包率低,能准确监测土壤墒情信息,并由自动灌溉系统将土壤湿度保持在适合植物生长最佳范围中,适用于山地果园。

关键词: 土壤墒情 自动灌溉 ZigBee 技术 太阳能 试验

中图分类号: TP29; S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0241-06

Design and Experiment of Automatic Irrigation Control System Based on Soil Moisture Meter

Yue Xuejun Liu Yongxin Hong Tiansheng Wang Yefu Quan Dongping Chen Zhuliang

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of water utilization in mountain orchards, an automatic irrigation control system based on soil moisture was designed. The system was composed of an S3C2440 ZigBee gateway, several CC2530 soil moisture sensing nodes and irrigation controlling nodes. In addition, solar batteries were applied to provide extra power and recharge lithium batteries. Using the self-organized ZigBee network, the gateway collected and updated soil moisture data to internet server for decision support. Therefore, irrigation process was handled according to soil moisture. The system test in a mountain orchard showed that the wireless network had a low packet loss rate (less than 15%), and maintained soil moisture in a suitable range (above 18%) for plant growth.

Key words: Soil moisture Automatic irrigation ZigBee technology Solar Experiment

引言

传统山地果园中灌溉以人力为主,多采用地表大面积漫灌方式,水资源有效利用率不到 50%^[1-2]。滴灌节水增产,可提高果园生产效率^[3-4]。国外滴灌系统与配套设施已产品化,在山地果园生产中取得良好收益^[5-6]。近年来中国滴灌自动控制系统研究进展迅猛,出现不同类型的灌溉自动控制装置。通过在灌溉系统上加装控制器与电

磁阀,进行开环控制灌溉开启与关闭;或加装土壤水分传感器与雨水传感器,采集果园墒情实现闭环控制灌溉开启与关闭^[7-8],但灌溉系统中控制器控制方式与墒情感知方式较简单。另一方面,由于山地果园环境恶劣并无市电,土壤墒情采集节点与电磁阀控制节点安装不同位置,急需进一步结合 WSN,复合多种农情信息采集,控制器低功耗设计,引入可持续能源,将灌溉系统智能化,增强节水、节能效果^[9]。

收稿日期: 2013-06-13 修回日期: 2013-07-06

* 国家星火计划资助项目(2012GA780043)、现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-27)和广东省自然科学基金资助项目(S2012010009856)

作者简介: 岳学军,副教授,主要从事电子信息及通信技术应用研究, E-mail: yuexuejun@scau.edu.cn

通讯作者: 洪添胜,教授,博士生导师,主要从事机电一体化技术和信息技术在农业中的应用研究, E-mail: tshong@scau.edu.cn

本文针对山地果园,选取 S3C2440 处理器与 CC2530 射频微控制器为硬件,采用电池供电,融合太阳能供电技术,采用 ZigBee 自行无线网络组网和低功耗低成本措施,构建基于土壤墒情自动灌溉控制系统。该系统可实时监测和记录土壤湿度数据,通过 Internet 上传服务器,采集节点向自动灌溉系统提供基本土壤湿度,自动控制系统根据土壤含水率自动灌溉。

1 总体方案设计

该系统由网关、协调器、路由器、采集节点以及灌溉控制节点构成,如图 1 所示。网关实现互联网与传感网连接与交互;协调器初始化信道、网络 ID 及频段设置,处理子节点加入请求;路由器传递节点间数据包,上传自身或采集节点向协调器发送的数据包,处理子节点加入请求;协调器与路由器为全功能设备;采集节点采集土壤墒情信息经 ZigBee 网络上传网关。

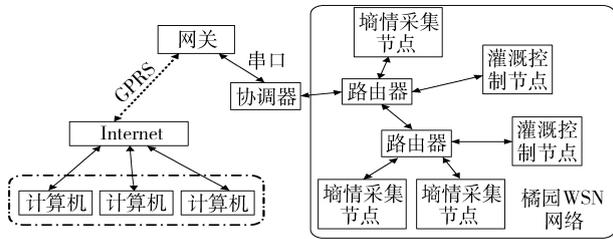


图 1 系统总体设计结构图

Fig. 1 Design chart of overall system

网关分析土壤墒情下指令给灌溉控制器,此外网关转发以太网服务器与 ZigBee 网络间的数据^[10-11],系统工作总流程图如图 2 所示。

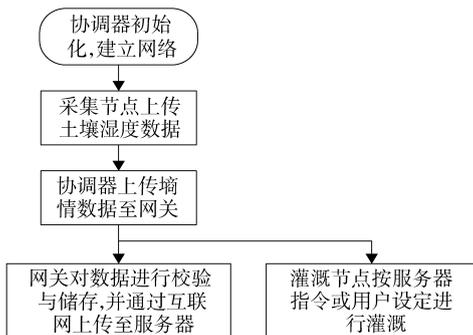


图 2 系统工作总流程图

Fig. 2 Flow chart of system

2 硬件设计

2.1 土壤墒情采集节点设计

系统中土壤墒情采集节点、路由器以及协调器等除运行程序相异外设备硬件电路一致:均以 TI 公司 CC2530 射频芯片为核心,集成 IEEE 802. 15. 4 射

频收发器,集成大容量 Flash 与众多功能模块。基于 CC2530 无线节点设计框图如图 3 所示,它只需天线、射频阻抗匹配电路、晶振等少量外围电路元器件便工作在 2. 4 GHz 频段;工作电压 1. 8 V,功耗低,适于电池供电。

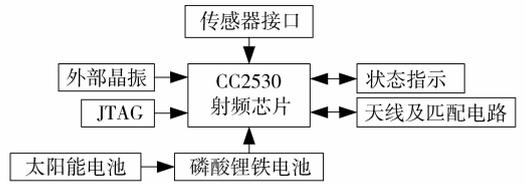


图 3 采集节点设计框图

Fig. 3 Block diagram of data acquisition node

本系统无线节点工作在野外,采用稳定性与可靠性较强的磷酸铁锂电池供电系统,其电池电压在 2. 75 ~ 3. 60 V 变化,无需额外稳压芯片;引入太阳能为电池充电,延长节点寿命^[12]。传感器接口可连接土壤水分传感器(试验选 Decagon 公司 EC-5 型)、土壤温度、湿度等电压输出形式的传感器。

2.2 基于 ARM 与 ZigBee 网关设计

无线网关 CPU 采用 Samsung 公司 ARM9 处理器 S3C2440,基于 ARM920T 内核,主频为 400 MHz,可扩展 Flash、SDRAM 等大容量存储器,片内集成内存管理单元(MMU),支持 Linux、Windows CE 等嵌入式系统。本系统无线网关如图 4 所示,ZigBee 协调器通过串口与 S3C2440 通信,将土壤墒情采集节点的数据转发给 S3C2440 处理器;或将电磁阀控制指令从网关转发到灌溉控制节点。GPRS DTU 型号为 WM801G,用触摸屏组成人机界面,用户可在现场观察或对网关配置参数进行修改。

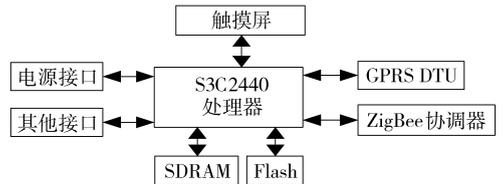


图 4 基于 S3C2440 的网关硬件设计框图

Fig. 4 Hardware diagram of ZigBee gateway based on S3C2440

2.3 灌溉控制节点设计

灌溉控制节点控制灌溉系统中的电磁阀实现灌溉系统的开启与关闭,控制电路如图 5 所示。由 CC2530 为核心,提供了基于液晶屏的 4 个按键(加、减、确认、返回)构成人机界面;通过人机界面,灌溉控制节点可被配置为 2 种工作模式:第 1 种为定时灌溉模式,用户设定灌溉开始与停止时间,可脱离 ZigBee 网独立自动灌溉;第 2 种为组网工作模式,由网关对土壤墒情进行综合判断后下达灌溉指令,智

能灌溉作业。2 种工作模式也可由节点根据通信链路状态自动切换：无法与网关通信时选独立工作模式，并每隔 10 min 尝试 1 次与网关恢复联系；反之选择组网工作模式。

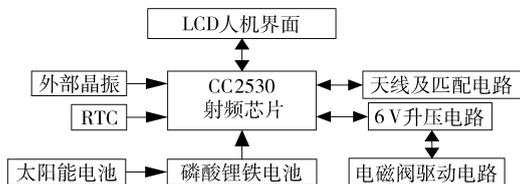


图 5 灌溉控制器硬件设计框图

Fig. 5 Hardware diagram of irrigation control node

滴灌系统选用 ZCS-08P 型双稳态脉冲式电磁阀，由温岭市博纳阀业有限公司制造，7.9 Ω 线圈内阻，驱动电压 6 V，高于磷酸铁锂电池输出电压 3.2 V，故增加 MAX608 升压芯片组成单端反击式升压电路，与 L9110S 集成 H 桥芯片，实现脉冲式电磁阀驱动，如图 6 所示，图中 MAX608_SWITCH 为使能端，H1、H2 为 H 桥控制端，VCC_VALVE 为升压电压输出。试验表明，电磁阀驱动电路输出电压为 6 V 或 -6 V，最大输出电流 1 A，满足驱动电磁阀的功率要求。

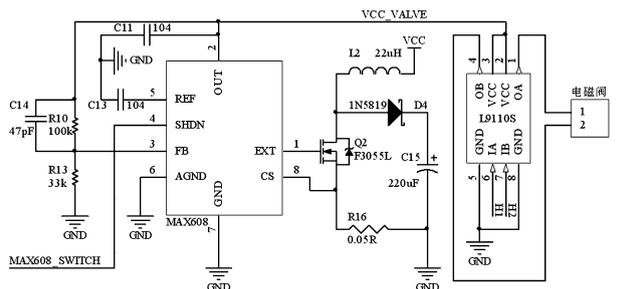


图 6 脉冲式电磁阀驱动电路图

Fig. 6 Valve driving module

3 软件设计

3.1 土壤墒情采集节点及灌溉控制节点

土壤墒情采集节点的信息采集分 2 种：定时采集为每隔一段固定时间，采集节点向协调器节点发送传感器采集到的数据；另一种为用户发送采集指令给协调器，由协调器向指定的终端采集节点发出请求。墒情采集节点工作流程如图 7 所示。

山地果园中，电磁阀往往在较大的范围内按地形随机分布，这给布线带来困难，故预留太阳能供电接口，提高系统对复杂山地的适应性。

灌溉控制节点组网模式配置时工作流程如图 8 所示，采用低功耗的软件设计策略，令灌溉控制节点大部分时间处于低功耗休眠状态以节省电能。为了节省功耗，系统运行完规定的任务之后便进入休眠模式，直到有事件将其唤醒^[13]。

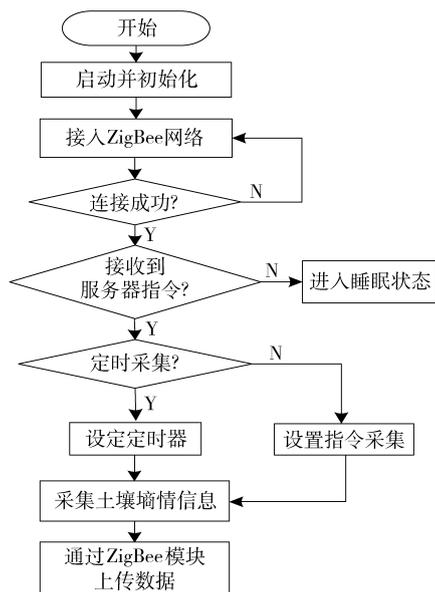


图 7 采集节点软件流程图

Fig. 7 Control software flow chart of acquisition node

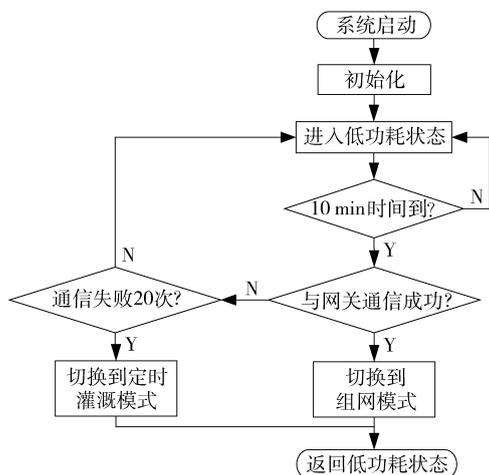


图 8 灌溉控制节点组网模式工作流程图

Fig. 8 Operating flowchart for irrigation control node in networking mode

3.2 基于 QT 与嵌入式 Linux 的网关服务程序设计

网关硬件电路上 ZigBee 协调器运行 TI Z-Stack 协议栈，并负责组建、维护 WSN 通信网，并通过串口与 S3C2440 处理器通信，嵌入式 Linux 系统通过 TCP/IP 协议实现数据在以太网与 ZigBee 网络间的转发并为用户提供图形化的配置界面。网关配置程序基于 QT Embedded 4. 6. 3 嵌入式图形库、串口通信类 QextSerial、TCP 通信类 QTcpSocket 共同构成，由于嵌入式系统资源有限，因此需要用大容量 SD 卡定时将内存中的数据以 . CSV 文件的形式写入 SD 卡。QT 图形库具有非常好的跨平台性与可移植性，因此，本系统开发时先在基于 Fedora 9 系统的 QT Designer IDE 中完成程序调试，再对工程进行交叉编译生成嵌入式 Linux 下的可执行文件^[14-15]。网关配置程序总体架构如图 9 所示。

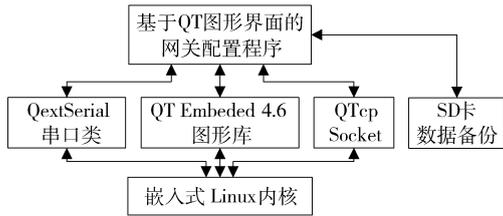


图9 嵌入式网关软件架构图

Fig.9 Software architecture for embedded gateway

网关服务程序流程如图10所示。采用多线程的设计方法,正常启动时,据用户配置初始化串口启动数据采集与网络服务线程,由WSN服务线程初始化 ZigBee 协调器采集存储数据、下发控制指令。网络服务线程连接远程服务器并获取控制指令。

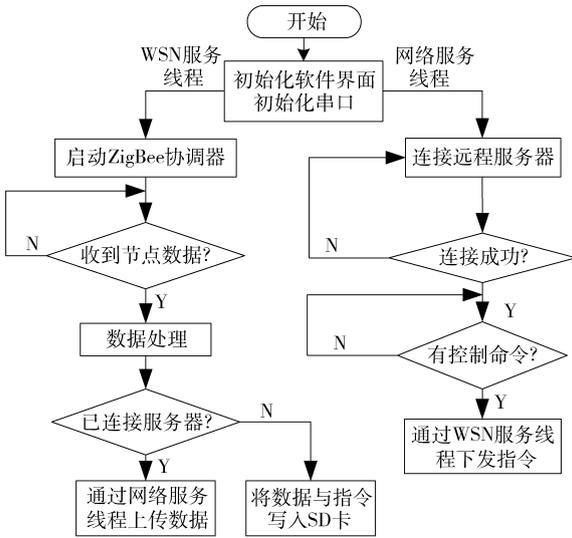


图10 网关及协调器软件设计流程图

Fig.10 Software flow chart of gateway and coordinator

4 试验结果与分析

试验先在室内按系统各组成部分顺序进行软件开发和测试,并以此为基础进行集成测试;当系统运行稳定后,在果园环境中进行测试。

4.1 通信距离与信号衰减测试

为了验证系统通信性能,选取华南农业大学南亚热带果树资源圃中的柑橘种植区域作为试验场地,面积约为 100 m × 300 m,坡度约为 20°,如图11所示。柑橘园预备试验橘树平均株高为 2.8 m,橘树冠层直径最大处距地高度约为 1.5 m,此时遮挡最为明显,多径衰减最为严重,故选定节点天线高度为 1.5 m,在恶劣条件下评测系统性能。

通信距离测试分为点对点通信和组网通信距离测试。点对点通信测试时,开启网关、协调器和1个测试节点。从相距 10 m 开始依次以 10 m 为步进值增加通信距离,直至两者相距 60 m。测试节点每隔 30 s 向网关发送一帧数据包,记下 2 h 内网关接收到

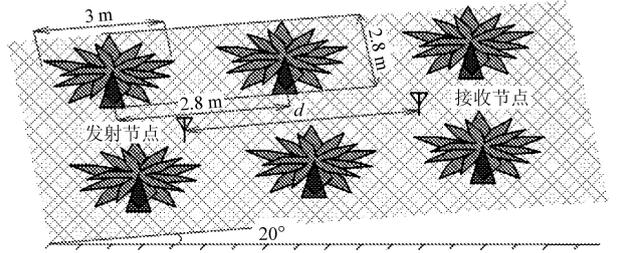


图11 通信信道测试场地

Fig.11 Diagram of experimental orchard

的数据包数量,如表1所示。

表1 单点通信距离测试数据

Tab.1 Data of signal point communication-distance test

距离/m	发送数据包	接收数据包	成功率/%
10	240	240	100
20	240	237	98.75
30	240	233	97.08
40	240	230	95.83
50	240	226	94.17
60	240	224	93.33

组网通信距离测试时,整个网络的所有节点开启,测试放置 1 个网关协调器、3 个路由器节点,每个路由器节点周围放置 2 个采集节点。从相距 10 m 开始依次增加 10 m 直至两者相距 60 m,每个节点每隔 60 s 向网关发送一帧数据包,记下 1 h 内网关接收到的数据包数量并统计接收信号强度平均值,如表1、2所示。

表2 组网通信距离测试数据

Tab.2 Data of net communication-distance test

距离/m	发送数据包	接收数据包	成功率/%
10	360	358	99.44
20	360	351	97.50
30	360	347	96.39
40	360	340	94.44
50	360	328	91.11
60	360	325	90.28

根据试验中采集节点发送的数据包和网关接收到的数据包来计算其数据包发送成功率,计算式为

$$P = \frac{N_r}{N_t} \times 100\%$$

式中 P——数据包发送成功率

N_r ——网关接收到数据包个数

N_t ——采集节点发送数据包总个数

试验表明,通信距离相同单点通信成功率优于组网通信,原因是组网后整个网络节点都向网关发送数据包,网关及路由器节点负荷加大,数据包丢失概率加大;通信距离小于 30 m,组网通信与单点通信成功率差异不显著;通信距离大于 60 m,数据包

成功接收率达 90%, 能满足实际需要。

无线信号在植被覆盖环境中传播, 均可能发生直射、反射、绕射和散射等各种传播机制。柑橘园测试无线信号的衰减可能会受到植被高度、天线高度、通信距离和植被的繁茂程度等因素的影响^[16]。有遮挡与无遮挡的环境下的数据如图 12 所示。

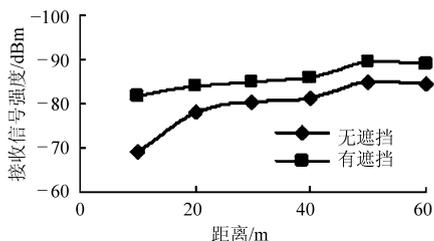


图 12 接收信号强度测试结果对比

Fig. 12 Comparison of received signal strength

试验表明, 信号强度与距离呈反比, 在同距离条件下, 有遮挡信号强度比无遮挡信号强度弱。无遮挡情况下, 接收信号强度与距离的间关系拟合为

$$I_0 = -8.5319 \ln d - 50.807 \quad (R^2 = 0.9527)$$

式中 I_0 ——接收信号强度, dBm

d ——通信距离, m

有遮挡情况下, 得到拟合公式为

$$I_0 = -4.2561 \ln d - 71.411 \quad (R^2 = 0.8675)$$

当 $d = 60$ m, 信号强度仅为 -89.08 dBm, 但仍能保持正常通信。

4.2 灌溉控制测试

山地橘园中选择滴灌进行灌溉试验, 选择距离 $d > 30$ m 的 A、B、C 3 区域: A 区为自动灌溉区域, 网关接收土壤墒情采集节点上传的土壤含水率数据, 取平均值后判断是否低于阈值 (本次试验设为 18%), 低于阈值后开启电磁阀进行滴灌, 直到平均土壤含水率大于 20% 后停止; B 区为定时灌溉区域, 由灌溉控制节点每天 8:00 开启滴灌电磁阀, 1 h 后关闭灌溉电磁阀, 网关仅负责采集土壤墒情数据, 不响应该区域灌溉控制节点的通信请求, 使该区域的节点工作在定时灌溉模式; C 区域为未安装滴灌系统且没有植被覆盖的空地, 仅布置土壤墒情采集节点, 向网关定时上传土壤墒情信息。数据记录时间段为: 2013 年 5 月 26 日至 2013 年 6 月 5 日。其中, 5 月 26 日与 6 月 5 日出现降雨, 雨量分别为 10 mm 与 19 mm。3 个区域每日平均土壤含水率统计结果如图 13 所示。

试验表明, A 区 (自动灌溉) 平均土壤含水率始终保持在阈值 (18%) 以上; B 区 (定时灌溉) 平均土壤含水率在 5 月 27 日至 5 月 30 日低于 18%, 其余时间土壤含水率大于阈值; C 区域土壤含水率在测试期间内土壤含水率缓慢降低。6 月 5 日强降雨

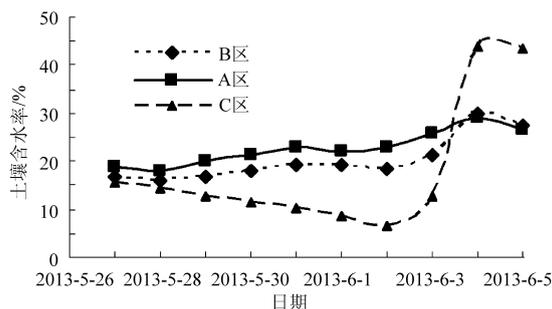


图 13 不同灌溉策略作用下土壤墒情变化趋势

Fig. 13 Comparison of soil moisture under different irrigation strategies

后, A 与 B 有植物覆盖的两区域土壤含水率达到 30%, C 区 (无植被覆盖) 含水率达到极大值为 43%。

自动灌水和定时灌水两种灌溉策略作用下, 土壤含水率变化趋势基本一致, 原因是采用滴灌系统为滴灌方式, 仅为植物补给少量水分, 并不造成含水率突变, 不会对土壤水分变化趋势产生根本影响。

试验结果表明, 系统在果园内工作 7 d, 灌溉电磁阀均能按时开闭, 土壤墒情采集节点遇暴雨时出现通信误码率增加、链路质量降低, 与文献 [17] 试验结果相符, 暴雨停止后, 通信链路自动恢复。无暴雨条件下, 每小时平均误码率低于 15%, 与文献 [18] 试验结果相符。该系统可靠性较高, 具备一定实践应用价值。

5 结论

(1) 基于 CC2530 射频芯片、ARM 处理器 S3C2440、嵌入式 Linux 系统, 设计了一套太阳能供电的基于土壤墒情的灌溉控制系统。通信距离测试试验及基于 RSSI 的信号衰减测试表明, 点对点及组网在山地橘园中距离为 60 m 以内的数据传输丢包率小于 10%, 信号衰减度小于 -90 dB。在山地橘园中能够保证橘园环境, 传感器网络数据有效上传至互联网中服务器, 实现对果园土壤墒情的检测。

(2) 土壤墒情试验表明, 在灌溉控制系统的自动调控下, 灌溉区域的土壤含水率围绕阈值波动。试验表明, 在有植被覆盖的土地上, 暴雨冲刷后, 土壤含水率波动较小。相比而言, 无植被覆盖的土地被暴雨冲刷后, 土壤含水率短时间内发生剧烈波动。因此建议在果园内尽量减少裸露的土地, 以保持整体土壤环境的稳定。

(3) 引入自动灌溉控制系统及土壤墒情检测, 在局部范围内改善农业生产种植的气候因素, 为植物生长发育提供最佳的环境条件, 进而提高农业的生产效率^[19-20]。试验表明, 本设计基于土壤墒情的

自动灌溉控制系统运行稳定可靠,有利于促进农业信息化的建设。在节水滴灌系统作用下,土壤含水率保持在较适宜植物生长的阈值以上,但含水率的变化趋势仍然会受环境因素与植被生长因素主导。

(4)本设计实现了基于土壤墒情的自动灌溉控制系统,但是仍然存在一些不足之处:采集节点所采集的土壤含水率应能代表较大范围内土壤含水率,

本试验中的土壤含水率采集到的值只能代表很小区域的含水率;不同农作物及同一种农作物不同生长期对水分要求相异,相应地系统土壤含水率阈值选取应变化,试验中取固定值;试验中阈值为假定值,而实际自动灌溉运行中,土壤含水率保持在农作物生长所需变化的阈值范围。

参 考 文 献

- 张林,吴普特,范兴科. 多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(9):40~45.
Zhang Lin, Wu Pute, Fan Xingke. Numerical simulation of soil water movement with drip irrigation of multiple point source[J]. Transactions of the CSAE,2010, 26(9): 40~45. (in Chinese)
- 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,2012,42(9):174~180.
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, 2012, 42(9): 174~180. (in Chinese)
- 李宝珠. 滴灌系统设计水头与工程输配水管网投资及运行的关系分析[J]. 农业工程学报,2008,24(3):72~76.
Li Baozhu. Analysis of the relationship between the designed water head and investment and operation of water supply pipe network for drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 72~76. (in Chinese)
- 张伟,何勇,裘正军,等. 基于无线传感网络与模糊控制的精细灌溉系统设计[J]. 农业工程学报,2009,25(增刊2):7~12.
Zhang Wei, He Yong, Qiu Zhengjun, et al. Design of precision irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp.2): 7~12. (in Chinese)
- 高峰,俞立,张文安,等. 基于无线传感器网络的作物水分状态监测系统研究与设计[J]. 农业工程学报,2009,25(2):107~112.
Gao Feng, Yu Li, Zhang Wen'an, et al. Research and design of crop water status monitoring system based on wireless sensor networks[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 107~112. (in Chinese)
- Kunihisa M, Osamu S, Osamu K, et al. New technologies and systems for high quality citrus fruit production, labor-saving and orchard construction in mountain areas of Japan[J]. Journal of Mountain Science, 2005, 2(1): 59~67.
- 刘永鑫,洪添胜,岳学军,等. 太阳能低功耗滴灌控制装置的设计与实现[J]. 农业工程学报,2012,28(20):20~26.
Liu Yongxin, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Design and experiment of drip irrigation control device with low-power solar energy[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 20~26. (in Chinese)
- 杨卫中,王一鸣,石庆兰,等. 吉林市土壤墒情监测系统开发及利用[J]. 农业工程学报,2010, 26(增刊2):177~181.
Yang Weizhong, Wang Yiming, Shi Qinglan, et al. Development and application of soil moisture monitor system in Jilin Region [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 26(Supp.2): 177~181. (in Chinese)
- 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)
- ZigBee Alliance. ZigBee Document053474r13[Z]. ZigBee Alliance,2006.
- 李文仲,段朝玉. ZigBee2006无线网络与无线定位实战[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008.
- 吴红斌,陈斌,郭彩云. 风光互补发电系统中混合储能单元的容量优化[J]. 农业工程学报,2011,27(4):241~245.
Wu Hongbin, Chen Bin, Guo Caiyun. Capacity optimization of hybrid energy storage units in wind/solar generation system[J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(4): 241~245. (in Chinese)
- 樊志平,洪添胜,刘志壮,等. 柑橘园土壤墒情远程监控系统设计与实现[J]. 农业工程学报,2010,26(8):205~210.
Fan Zhiping, Hong Tiansheng, Liu Zhizhuang, et al. Design and realization of remote monitoring system for soil moisture in citrus orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8): 205~210. (in Chinese)
- 成洁,卢紫毅. Linux窗口程序设计-Qt4精彩实例分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:247~256.
- 邱铁,周玉,张民垒,等. Linux环境下QT4图形界面与MySQL编程[M]. 北京:机械工业出版社,2012:2~10.
- 文韬,洪添胜,李震,等. 橘园无线传感器网络不同节点部署方式下的射频信号传播试验[J]. 农业工程学报,2010, 26(6):211~215.
Wen Tao, Hong Tiansheng, Li Zhen, et al. Test of wireless sensor network radio frequency signal propagation based on different node deployments in citrus orchards[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 211~215. (in Chinese)
- 岳学军,王叶夫,洪添胜,等. 基于信道测试的橘园WSN网络部署试验[J]. 农业机械学报,2013,44(5):213~218.
Yue Xuejun, Wang Yefu, Hong Tiansheng, et al. WSN layout experiment based on radio frequency propagation tests in citrus orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):213~218. (in Chinese)

3 结论

(1) 整个金三角地区植被覆盖度自西北向东南呈增加趋势。分市统计结果显示:整体植被覆盖状况延安市最优,其次是平凉市、庆阳市、榆林市,鄂尔多斯市和宁东地区的优劣状况在不同年份间有所差异。

(2) 金三角地区 2000~2009 年植被覆盖度呈增加趋势,这与区域内近年来所实施的生态保护工程(如:退耕还林、禁牧封育、三北防护林、天然林资源保护、森林生态效益补偿、野生动植物保护区、湿

地恢复与保护等重点项目)有关。其中,2008 年最高,为 45.45%,2000 年最低,为 33.74%,2005 年和 2009 年略有下降。

(3) 与 2000 年相比,2009 年区域内大多数地区植被覆盖度增加,少部分地区的植被覆盖度降低,其中鄂尔多斯市、庆阳市和宁东地区植被覆盖度降低的面积比例相对较大。从人类活动胁迫角度分析其原因,主要有:城市扩张占用植被用地;近年来的区域资源开发强度增加,在不同程度上造成了植被破坏或退化。

参 考 文 献

- 1 李云玲,汪党献,张敏秋. 蒙陕甘宁能源金三角地区水资源需求分析与保障对策[J]. 水电能源科学,2011,30(6):35~37.
Li Yunling, Wang Dangxian, Zhang Minqiu. Analysis of water resources demand and guaranteed supply measures of Golden Triangle energy in MSGN region[J]. Water Resources and Power, 2011,30(6):35~37. (in Chinese)
- 2 国务院发展研究中心课题组. 主体功能区和分类管理政策研究[M]. 北京:中国发展出版社,2008.
- 3 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
- 4 王桥,魏斌,王昌佐,等. 基于环境一号卫星的生态环境遥感监测[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 5 杨强. 基于遥感的榆林地区生态脆弱性研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- 6 丁照东,滕骏华,孙美仙,等. 基于遥感的海岛植被生态宏观评价方法初探[J]. 海洋学研究,2011,29(1):62~67.
Ding Zhaodong, Teng Junhua, Sun Meixian, et al. Preliminary study on macro evaluation approach of island vegetation ecology based on RS[J]. Journal of Marine Sciences, 2011,29(1):62~67. (in Chinese)
- 7 孙红雨,王长耀,牛铮,等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报,1998,2(3):204~209.
Sun Hongyu, Wang Changyao, Niu Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998,2(3):204~209. (in Chinese)
- 8 王红说,黄敬峰. 基于 MODIS NDVI 时间序列的植被覆盖变化特征研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2009,35(1):105~111.
Wang Hongshuo, Huang Jingfeng. Study on characteristics of land cover change using MODIS NDVI time series[J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2009, 35(1):105~111. (in Chinese)
- 9 吴云,曾源,赵炎,等. 基于 MODIS 数据的海河流域植被覆盖度估算及动态变化分析[J]. 资源科学,2010,32(7):1417~1424.
Wu Yun, Zeng Yuan, Zhao Yan, et al. Monitoring and dynamic analysis of fractional vegetation cover in the Hai River basin based on MODIS data[J]. Resources Science, 2010, 32(7):1417~1424. (in Chinese)
- 10 Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR Data for use in numerical weather prediction models[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(8):1533~1543.

(上接第 246 页)

- 18 徐兴,洪添胜,岳学军,等. 山地橘园无线环境监测系统优化设计及提高监测有效性[J]. 农业工程学报,2013,29(11):147~155.
Xu Xing, Hong Tiansheng, Yue Xuejun, et al. Optimal design of wireless monitoring system in mountain citrus orchard and improvement monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(11):147~155. (in Chinese)
- 19 Sam Moore Young, Han J, Ahmad Khalilian, et al. In-strumentation for variable-rate later al irrigation system[C]//2005 ASAE Annual International Meeting, 2005:17~20.
- 20 Werner-Allen G, Johnson J, Ruiz M, et al. Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network[C]//Proceedings of the Second European Workshop on Wireless Sensor Networks,2005,1:108~120.