

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.041

集约化条件下农田地面灌溉智能化管理研究进展

吴彩丽^{1,2}, 白美健^{1,2}, 李益农^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院 水利研究所, 北京 100048;

2. 国家节水灌溉工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 文章整理了2010年—2016年间影响力较大的相关刊物上有关地面灌溉管理及技术方面论文的总体分布情况, 系统评述了从单一田块拓展到集约化种植区域上的灌溉系统需要突破的四种关键技术(数值模拟方法、优化设计方法、信息采集与传输技术和智能化灌溉管理技术)的研究进展。结果表明, 智能化管理是集约化条件下农田灌溉的一个重要发展方向, 未来的发展趋势将是建立适合灌区水文特点的分布式水文模型及考虑土壤水力特性和微地形空间变异性的农田尺度灌溉模拟模型, 开展农田尺度灌溉系统优化设计研究, 研发智能灌溉系统及设备, 推动灌溉管理走向自动化、智能化。

关键词: 集约化; 地面灌溉; 智能化

中图分类号: S274.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)02—0222—06

Review on Intelligent Management of Surface Irrigation Under Intensive Condition

WU Caili^{1,2}, BAI Meijian^{1,2}, LI Yinong^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100048, China;

2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing, 100048, China)

Abstract: This paper reviewed the intelligent management of field surface irrigation system, and analyzed the overall distribution situation of surface irrigation management and technology papers on influential relevant journals between 2010 and 2016. It has systematic review Four key technologies (numerical simulation method, the optimization design method, the information acquisition and transmission technology and intelligent irrigation management technology) which need to be improved were summarized. It concluded that the intelligent management is an important development direction under the condition of intensive field irrigation. The future development trend will be to develop distributed hydrological model which is suitable to the hydrology characteristics of the irrigation district and farmland scale irrigation simulation model which considered the soil hydraulic characteristics and spatial variability, study on optimization design of farmland scale irrigation system, and to develop intelligent irrigation system and equipment. The future development directions of irrigation management are modernization, automation and intellectualization.

Keywords: intensive, surface irrigation, intelligent

集约化条件下, 地面灌溉的控制与管理范围从田间扩展到区域, 其主要变化反映在系统规模变大, 地形和工程状况复杂, 灌溉信息无线采集与传输距离加长, 控制目标多元化。因此, 如何基于区域要素空间变异性对地面灌溉系统进行协同多目标优化和智能化管理, 以期到达节水、节地、省工、增效和减污的目标, 是当前集约化农业地面灌溉管理中必须要

解决的问题。目前我国在智能化地面灌溉管理技术与设备研发方面的工作处于初步探索阶段, 与国外存在显著差距。

因此, 本论文拟通过对国际上集约化条件下农田地面灌溉系统智能化管理发展动态的调研, 更好地把准集约化农田灌溉管理的发展方向, 以期为促进我国集约化农田灌溉方式的发展提供理论支撑。

1 地面灌溉管理及技术方面的研究动态

笔者整理了 2010 年—2016 年间影响力较大的相关刊物上有关地面灌溉管理及技术方面论文的总分布情况,归纳与分析发展动态。这里分别列出中、外文两种灌溉领域影响较大的期刊:《水利学报》和《农业工程学报》(中文),《Agricultural Water Management》和《Irrigation Science》(外文)。

图 1 为四种刊物从 2010 到 2016 年间(《Irrigation Science》没有查到 2010 年的数据,故图中数据从 2011 年开始)论文总篇数、相关论文篇数及相关论文占总篇数的比例图。据图 1 可知,《水利学报》的论文总篇数为 207 篇/年,其中地面灌溉管理及技术相关论文为 8.9 篇/年,所占比例为 4.4%,所占比例有增加趋势;《农业工程学报》农业水土工程板块的论文总篇数为 188 篇/年,其中地面灌溉管理及技术相关论文为 17.7 篇/年,占总篇数的比例为 9.6%,所占比例有减少趋势;《Agricultural Water Management》

的论文总篇数为 264 篇/年,其中地面灌溉管理及技术相关论文为 27.8 篇/年,占总篇数的比例为 10%,所占比例呈上升趋势,尤其是 2016 年,由于加了农业水管理的特刊,使得相关论文达到了 60 篇;《Irrigation Science》的论文总篇数为 49.6 篇/年,其中地面灌溉管理及技术相关论文为 8.5 篇/年,占总篇数的比例为 17.6%,近两年总体平稳。总体而言,地面灌溉管理及技术相关论文所占的比例总体呈上升趋势,尤其是近两年,这表明对于地面灌溉管理及技术方面的研究越来越受到重视。

2 集约化农田地面灌溉智能化管理关键技术研究进展

从一家一户经营体制下的单一田块拓展到集约化种植区域上的灌溉系统,有四项关键灌溉技术需要突破:理论研究方面的数值模拟方法和优化设计方法,应用研究方面的信息采集与传输技术和智能化灌溉管理技术。

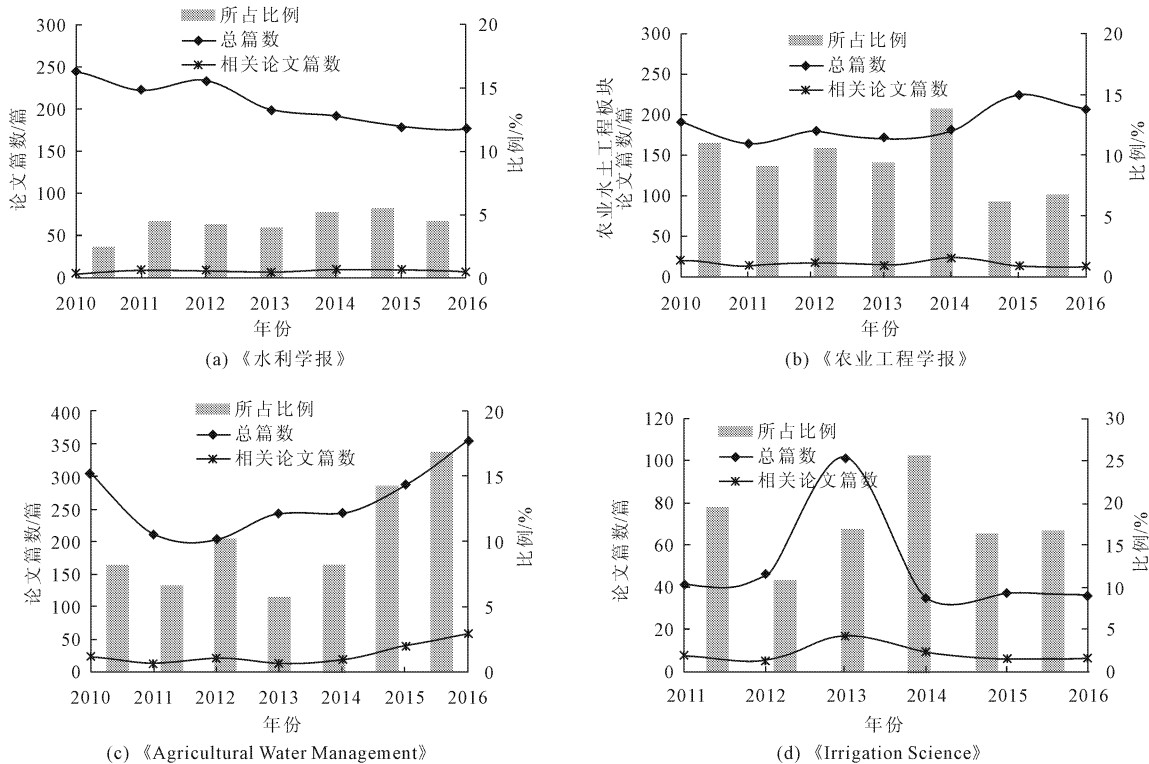


图 1 四种重要刊物上地面灌溉管理及技术相关论文分布情况

2.1 理论研究

2.1.1 数值模拟方法

由于区域农田灌溉系统灌溉水循环过程涉及田间配水系统和畦田地表-土壤,需要考虑区域尺度上土壤特性空间变异性,降雨、蒸散、径流时空差异

性,以及人类活动随机性的影响,使得区域灌溉水循环比田块尺度灌溉水循环更为复杂,且又不同于自然流域的水文特征,所以田块尺度的数值模拟方法及水文学的数值模拟方法都不能简单地应用在区域灌溉水循环过程的模拟上。国内外学者围绕区域尺

度的水分运移模拟模型进行了大量研究^[1-10],研究成果主要分为灌区尺度水文循环模拟模型和农田尺度地面灌溉模拟模型两种类型。就灌区尺度而言,目前国内外还没有真正构建基于灌区水文循环的分布式水文模型,而多采用把反映灌溉系统特性的模块嵌入自然流域水文模型中的方法进行灌区水文循环的模拟。就农田尺度而言,随着空间尺度的增大,土壤特性和田面微地形等的空间分布呈现出明显的随机性,再加上区域回归水的重复利用等问题,使得农田尺度地面灌溉模拟比田块尺度更为复杂。近年来不少学者通过试验监测和数值模拟手段尝试探讨农田灌溉尺度变化问题^[11-21],但这些研究多是基于水量平衡原理建立概念性的框架模型,显然对水分运移过程的模拟精度相对动力学模型会差一些。

2.1.2 优化设计方法

由于单一田块灌溉要素的优化设计所考虑的目标相对单一,而区域尺度下农田地面灌溉系统的设计需要考虑节水、节地、省工等多目标和规模化田块下供水条件等制约,故必须考虑协同多目标优化设计方法。国内外学者对地面灌溉系统的优化设计方面的研究概括起来主要包括:(1)灌水技术要素对灌溉性能的影响分析:如李益农等^[22]通过田间试验定性分析了灌水效率和灌溉水均匀度随田块平整精度、土壤入渗参数 k 值、畦长、供水时间、入畦流量和田面纵坡的变化关系;王维汉等^[23]基于实测数据,利用灌溉模型 SRFR 或 SIRMOLD 反求不同土质的土壤入渗参数,模拟分析灌水质量对各灌溉要素的敏感性,提出不同土质下适宜的畦田规格、入畦单宽流量、改口成数等。陈博等^[24]比较分析了不同灌溉方式条件下,不同沟灌畦面结构产生的田面土壤特性和灌水效果的差异,得到不同畦面结构下适宜的田块规格。(2)灌水技术要素的优化组合分析:如刘钰等^[25]通过数值模拟获得灌溉技术要素与灌溉性能指标的对应关系,采用等效率图法进行灌溉技术要素优化设计。聂卫波等^[26]基于田间试验和数值模拟,在不同灌水技术要素组合下,利用 SIPAR_ID 模型估算土壤参数,并利用图表法得到特定需水量和性能指标的畦灌灌水技术要素组合。缴锡云等^[27]提出畦灌稳健设计方法,将单宽流量、改口成数、畦长作为技术要素并考虑其控制误差,将入渗参数、糙率系数和田面纵坡作为自然因素并考虑其波动,模拟试验筛选最优灌水技术要素组合。(3)灌溉系统优化设计:如 Holzapfel 等^[28]以净经济效益为目标,入畦(沟)流量、畦(沟)长、灌水时间和畦宽为

变量,建立沟灌和畦灌系统的线性代数优化模型。Reddy^[29]以成本最小为目标,分析灌溉系统的各要素对灌溉费用的影响,通过单调分析和约束分析求解最佳灌溉技术参数组合。Raghuwanshil 等^[30]将包含灌溉计划的季节性沟灌模型和运动波水力模型结合,以灌水费用最小为目标,以入流量和灌水时间为变量,采用预测的作物灌溉需水量对沟灌的灌水时间和入流量进行优化。

2.2 应用研究

2.2.1 信息采集与传输技术

2.2.1.1 无线传感器网络

由于农业生产一般都在野外,适合采用无线传输方式。集约化条件下,从田间扩展到区域的灌溉控制与管理,控制系统规模变大,地形和工程状况复杂,灌溉信息无线采集与传输距离加长,因此,如何精确、稳定、实时地采集与传输灌溉信息是区域尺度灌溉系统实现精准控制的前提。无线传感器网络(WSN)是一种分布式传感器网络,通过无线方式通信,节点设置简单灵活,设备位置可以随时更改,网络容量大且成本低廉,非常适合于智能灌溉系统^[31-35]。

2.2.1.2 无线通信技术

田间无线数据传输受到作物的生长状况、气候变化、节点布设共同影响,严重影响通讯质量,是无线传感器网络在集约化农田应用的瓶颈之一。一家一户经营模式下的地面灌溉控制多采用经验控制,控制设施简单,规模化农田灌溉下田块规格、入畦流量等都相对较大,传统的灌溉控制方式难以操作,因此,需要结合规模化农田灌溉特点研发智能化灌溉控制技术与设备。

国内目前在灌溉系统中应用较多的无线通信技术是 ZigBee 和 GPRS^[36-39]。相对来说,GPRS 数据率高,传输距离远,便于远程传输,并且能直接与 Internet 相连,但是功耗、成本与收费相对较高;ZigBee 功耗低、成本低,但是数据率相对较低,单跳传输距离相对较近。因此,将两者结合起来共同用于灌溉系统数据传输是未来发展的趋势^[36-51]。

2.2.2 智能化管理技术

智能化灌溉是通过各种无线传感器对农田灌溉信息进行实时采集,并数字化后传输给中央控制台,再利用智能系统科学决策管理方案,及时精确控制灌水设备启闭,以保证对农田进行适时适量的灌溉。

2.2.2.1 智能灌溉系统及设备

智能化灌溉系统及设备生产走在世界最前沿的

公司是美国的雨鸟、亨特等,都开发了先进的智能控制系统。此外,还有以色列的 IgalAgro 系列产品,澳大利亚的 Hardle Irrigation 公司开发的灌溉控制产品,也是目前农机控制比较先进的智能控制系统。

国内智能灌溉系统及设备的研制从“九五”期间才真正开始起步,技术落后,现在多数还处于实验室研发阶段,自主研发且能够推广使用的智能灌溉控制系统还不多见。目前,国内灌溉设备多以引进国外技术为主,有关灌溉设备的生产企业大小近 500 家,其中有相当一部分代理的是美国和以色列的产品。总体上,与节水发达国家相比,我国智能灌溉系统及设备的研发还存在很大的发展潜力^[52]。

2.2.2.2 智能灌溉控制指标

目前,智能灌溉系统通常采用三种控制指标:作物蒸腾量、土壤湿度和作物生理指标。其中,以彭曼公式估算作物蒸腾量是最传统的灌溉策略,但是采用彭曼公式计算作物蒸腾量的过程中,需要大量的气象数据,计算较为复杂。对于大尺度范围内蒸发蒸腾量估算,国内外有关学者采用遥感方法,可以更加有效地反映蒸发蒸散量分布情况,但是遥感技术的适用性和估算精度上受到地表植被覆盖度、天气情况、昼夜时段以及假设条件的影响较大^[53-55];以土壤湿度为控制指标决定是否进行灌溉,以通过对土壤湿度的控制达到智能节水灌溉的目的^[56-59]是近年来国内外学者研究的重要内容,一般作物生长较好的土壤含水量为田间持水量的 60%~80%,但是这个值会因随着土质、团粒结构等诸多因素的不同而变化,因此,以土壤湿度值作为灌溉依据时,需因地制宜,且在灌溉前适时地采集土壤湿度信息;基于作物生理生态信息的监测方法,角度更加微观,数据更加精确,更加体现了作物本身的主体作用,通过自身的指标反映水分亏缺状况,可以更直接地用于指导灌溉。但是,需要的监测仪器精密,价格昂贵,目前常用于实验室研究^[60-62]。

3 结论及展望

通过上述相关研究进展评述,发现国内外对于集约化条件下农田地面灌溉智能化管理方面的研究已成为重点。综合现状存在的实际问题,笔者提出我国未来集约化条件下农田地面灌溉智能化管理方面的主要研究方向及内容,供相关人士参考。

(1) 理论研究方面

① 由于灌区的水分循环较自然流域复杂得多且受人为的影响比较大,故直接然流域水文模型用

于灌区时存在较大的困难。因此,应综合考虑灌区因灌溉及人类活动对水分循环产生的影响,加强灌溉、排水、水文、气象等方面的交叉研究,合理划分计算单元,并结合 GIS 和 RS 技术建立适合灌区水文特点的分布式水文模型。

② 随着农田尺度的扩大,土壤入渗参数空间变异增强,农田尺度的水流运动问题牵扯诸多环节,颇为复杂,目前研究中还没有经实际验证与率定的能够精确模拟农田尺度水分运移过程的动力学模型,因此,需借助已有的地面灌溉地表水流运动模型和高精度饱和-非饱和土壤水动力学模型,通过农田尺度土壤水力特性和田面微地形参数联合随机模拟方法,建立考虑土壤水力特性和微地形空间变异性的农田尺度灌溉模拟模型。

③ 由于我国至今没有方便基层规划设计者使用的地面灌溉系统评价和设计工具,现有的系统设计工作主要依赖于管理者的知识经验而缺乏客观依据。因此,要开展不同类型灌区的农田尺度灌溉系统优化设计研究,考虑区域时空变异性、多目标决策等因素,优化田间灌溉系统的布局,构建现代化的农田灌溉系统,并形成相关规范,为基层规划设计者进行田间灌溉系统的优化设计提供实用的工具。

(2) 应用研究方面

智能化管理是集约化条件下农田灌溉的一个重要发展方向。我国对智能灌溉系统的研究起步晚,目前虽然有多加相关单位在进行研究,但有些是直接引进照搬国外的技术,有些是处于试生产的实验室阶段,技术还很很不成熟,远没有形成规模。因此,从我国现阶段的实际国情出发,研制出适合本土自然气候、土地资源等特殊情况,且符合我国农民实际购买能力的智能灌溉系统及设备,满足我国现阶段灌溉管理的需求是当务之急。与 3S 等技术的结合应用,推动灌溉管理走向现代化、自动化、智能化,将是未来农业灌溉发展的必然趋势。

参考文献:

- [1] 贾仰文,王 浩,倪广恒,等.分布式流域水文模型原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [2] 王 欣,李 兰,刘志文,等.LL-Ⅲ分布式水文模型在宁蒙灌区水资源研究中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2007,40(6):16-35.
- [3] 桑学锋,周祖吴,秦大庸,等.改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用[J].水利学报,2008,39(12):1377-1383.
- [4] 郑 捷,李光永,韩振中,等.改进的 SWAT 模型在平原

- 灌区的应用[J]. 水利学报, 2011, 42(1): 88-97.
- [5] Dechmi F, Burguete J, Skhiri A. SWAT application in intensive irrigation systems: model modification, calibration and validation[J]. Journal of Hydrology, 2012, 470 – 471(12): 227-238.
 - [6] Sophocleous M, Perkins S P. Methodology and application of combined watershed and ground – water models in Kansas [J]. Journal of Hydrology, 2000, 236(3): 185-201.
 - [7] Droogers P, Bastiaanssen W G, Beyazgil M, et al. Distributed agro-hydrological modeling of an irrigation system in western Turkey[J]. Agricultural Water Management, 2000, 43(2): 183-202.
 - [8] Luo Y, Sophocleous M. Two-way coupling of unsaturated-saturated flow by integrating the SWAT and MODFLOW models with application in an irrigation district in arid region of West China[J]. Journal of Arid Land, 2011, 3(3): 164-173.
 - [9] Khan S, Abbas A. Upscaling water savings from farm to irrigation system level using GIS-based agro-hydrological modelling[J]. Irrigation and Drainage, 2007, 56(1): 29-42.
 - [10] 徐旭, 黄冠华, 屈忠义, 等. 区域尺度农田水盐动态模拟模型. GSWAP[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 58-63.
 - [11] Singh R, Kroes J G, Dam J C V, et al. Distributed ecohydrological modeling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India I: current water management and its productivity[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 692-713.
 - [12] Singh R, Kroes J G, Dam J C V, et al. Distributed ecohydrological modeling to evaluate the performance of irrigation system in Sirsa district, India II: impact of viable water management scenarios[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 714-723.
 - [13] Molden D. Accounting for Water Use and Productivity[M]. Colombo: International Water Management Institute, 1997.
 - [14] Molden D, Sakthivadivel R. Water accounting to assess use and productivity of water[J]. Water Resources Development, 1999, 15(1/2): 55-71.
 - [15] Khan S, Abbas A. Upscaling water savings from farm to irrigation system level using GIS – based agro – hydrologic modeling[J]. Irrigation Drainage, 2007, 56(1): 29-42.
 - [16] Paydar Z, Gallant J. A catchment framework for 1 – D models introducing FLUSH and its application[J]. Hydrol Process, 2008, 22(13): 2094-2104.
 - [17] Todorovic M, Steduto P. A GIS for irrigation management [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 28(4/5): 163-174.
 - [18] Skonard C J. A field – scale furrow irrigation model[D]. Nebraska: University of Nebraska, 2012.
 - [19] Awan U K, Tischbein B, Martius C. Combining hydrological modeling and GIS approach to determine the spatial distribution of groundwater recharge in an arid irrigation scheme [J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 793-806.
 - [20] 高学睿. 基于水循环模拟的农田土壤水效用评价方法与应用[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
 - [21] 汪伟伟. 基于分布式水文模型的灌区用水效率评价 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
 - [22] 李益农, 许迪, 李福祥. 影响水平畦田灌溉质量的灌水技术要素分析[J]. 灌溉排水, 2001, 20(4): 10-14.
 - [23] 王维汉, 缴锡云, 彭世彰, 等. 基于稳健设计理论的畦灌质量敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 37-42.
 - [24] 陈博, 欧阳竹, 刘恩民, 等. 不同畦面结构下地面灌溉效果的对比分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 30-36.
 - [25] 刘钰, 惠士博. 畦田最优灌水技术参数组合的确定 [J]. 水利学报, 1986(1): 9-22.
 - [26] 聂卫波, 费良军, 马孝义. 畦灌灌水技术要素组合优化 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 83-88.
 - [27] 缴锡云, 王维汉, 王志涛, 等. 基于田口方法的畦灌稳健设计[J]. 水利学报, 2013, 44(3): 349-354.
 - [28] Holzapfel E A, Mafino M A, Chavez – Morales J. Surface irrigation optimization models[J]. Irrigation Drainage Engineering, 1986, 112(1): 1-19.
 - [29] Reddy J M. Optimization of furrow irrigation system design parameters considering drainage and runoff water quality constraints[J]. Irrigation Science, 1994, 15: 123-136.
 - [30] Raghuvanshi N S, Wallender W W. Forecasting and optimization furrow irrigation management decision variables[J]. Irrigation Science, 1999, 19: 1-6.
 - [31] Yoo S, Kim J, Kim T. et al. A2S: Automated agriculture system based on WSN[C]//In Proceedings of ISCE 2007, International Symposium on Consumer Electronics, USA: IEEE, 2007.
 - [32] Kim Y, Evans R G, Iversen W M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(7): 1379-1387.
 - [33] Park D H, Park J W. Wireless sensor network – based greenhouse environment monitoring and automatic control system for dew condensation prevention[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3640-3651.
 - [34] 于勃. 用于智能灌溉系统的无线传感器网络节点的设计[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
 - [35] 何龙, 闻珍霞, 杨海清, 等. 无线传感网络技术在设施农业中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(12): 236-239.

- [36] Qiu W, Saleem K, Halpern M, et al. Robust multipath links for wireless sensor networks in irrigation applications [C]//International Conference on Intelligent Sensors, IEEE Xplore, 2007:95-100.
- [37] Bencini L, Chiti F, Colloidi G. et al. Agricultural monitoring based on wireless sensor network technology: real long life deployments for physiology and pathogens control [C]//Proceedings - 2009 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM. IEEE, 2009:372-377.
- [38] 潘嵘嵘,张浩,朱翔,等.基于GPRS的灌区水资源监控系统设计与实现[J].计算机测量与控制,2011(12):2958-2960.
- [39] Kittisut P, Pornsuwancharoen N. Design of information environment chicken farm for management which based upon GPRS technology[J]. Procedia Engineering, 2012(32):342-347.
- [40] 王益祥,吴林,段俊丽.基于无线传感器网络的微灌监控系统研究[J].测控技术,2009,28(3):64-67.
- [41] 韩华峰,杜克明,孙忠富,等.基于ZigBee网络的温室环境远程监控系统设计与应用[J].农业工程学报,2009,25(7):158-163.
- [42] 陈辉.基于ZigBee和GPRS的温室番茄远程智能灌溉系统的研究与实现[D].杭州:浙江大学,2013.
- [43] Qiu W Z, Saleem K, Pham M, et al. Robust multipath links for wireless sensor networks in irrigation applications: 3rd intelligent sensors [C]//Sensor Networks and Information Processing Conference, Australia: IEEE Xplore, 2007.
- [44] Andrade - Sanchez, Pierce P, Francis J, et al. Performance assessment of wireless sensor networks in agricultural setting [C]//2007 ASABE Annual International meeting, USA:[s.n.], 2007.
- [45] Lea•Cox J D, Kantor G, Anhalt J, et al. A wireless sensor network for the nursery and greenhouse industry [C]//In Proceedings of Southern Nursery Association Research Conference, USA:[s.n.], 2007.
- [46] Hwang J, Shin C, Yoe H. A wireless sensor network - based ubiquitous paprika growth management system [J]. Sensors 2010, 10(12):11566-11589.
- [47] Siuli Roy A D, Bandyopadhyay S. Agro - sense: precision agriculture using sensor - based wireless mesh networks [C]//Innovations in Ngn: Future Network & Services, K - ingn First Itu - t Kaleidoscope Academic Conference Innovations. IEEE, 2008.
- [48] Luca B, Francesco C, Giovanni C, et al. Agricultural monitoring based on Wireless Sensor Network technology: Real long life deployments for physiology and pathogens control [C]//Proceedings - 2009 3rd International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM. IEEE, 2009:372-377.
- [49] 郎需强.基于ZigBee和GPRS的远程果园智能灌溉系统的设计与实现[D].山东:山东农业大学,2011.
- [50] 张胜.基于ZigBee无线传感网和模糊控制的温室番茄智能灌溉系统设计[D].浙江:浙江大学,2011.
- [51] 杨翠翠.基于无线网络的环境监测与智控灌溉系统设计研究[D].山东:山东农业大学,2015.
- [52] 田宏武,郑文刚,李寒.大田农业节水物联网技术应用现状与发展趋势[J].农业工程学报,2016,32(21):1-12.
- [53] Zwart S J, Bastiaanssen W G M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems [J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(3):287-296.
- [54] 吴炳方,邵建华.遥感估算蒸腾蒸发量的时空尺度推演方法及应用[J].水利学报,2006,37(3):286-292.
- [55] 陈鹤,杨大文,刘钰,等.基于遥感模型的华北平原农田蒸散发量估算[J].灌溉排水学报,2014,33(4):21-25.
- [56] 许一飞.国外农业高效用水的研究应用及发展趋势[J].节水灌溉,1997(4):30-31.
- [57] Vellidis G, Tucker M, Kvien C, et al. A real - time wireless smart sensor array for scheduling irrigation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(1):44-50.
- [58] 段俊丽.基于无线传感器网络的微灌监控系统的研究与开发[D].南京:南京理工大学,2008.
- [59] 崔天时,杨广林,刘磊,等.基于模糊控制的温室灌溉控制系统的研究[J].农机化研究,2010,32(3):84-86.
- [60] 高峰,俞立,张文安,等.基于茎直径变化的无线传感器网络作物精量灌溉系统[J].农业工程学报,2008,24(11):7-13.
- [61] 高峰,俞立,张文安,等.基于无线传感器网络的作物水分状况监测系统研究与设计[J].农业工程学报,2009,25(2):107-111.
- [62] 平毅,郭磊.低功耗自动灌溉控制器设计[J].现代电子技术,2014,37(10):104-106.