

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.009

绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析*

赵燕东 马扬飞 王勇志

(北京林业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 为了提高绿地精准灌溉控制系统中两点法测量土壤墒情的测量精度,通过对土壤水分传感器一体化的研究,设计了双层复合土壤水分传感器,相比于传统的两个传感器策略,使用该复合型土壤水分传感器测量结果更加精确,且降低了能耗。为了获得绿地作物的最优灌溉量,确保灌溉水不浪费且能满足作物正常生长的需求,以高羊茅为例,通过实验,在综合分析高羊茅生长需求、土壤墒情和部分气象资料的基础上,得出适合于高羊茅的最优灌溉量为12 mm。

关键词: 绿地 精准灌溉 控制系统 最优灌溉量 双层复合土壤水分传感器

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0046-05

Green Land Precision Irrigation Control System and Analysis of Optimal Irrigation Amount

Zhao Yandong Ma Yangfei Wang Yongzhi

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract

With the aim to raise measure accuracy of double-depth measuring water content tactics in precision irrigation control system, by integration research of water content sensor, dual-layer composite soil water content sensor was worked out. Compared with the traditional two sensors' tactics, using dual-layer composite soil water content sensor, the measurement result can be more accurate, and energy consumption was reduced. In order to achieve optimal irrigation amount of green land plant, ensure the irrigation not be wasted and satisfy plant's normal need, the experiments were carried out by taking tall fescue for an example. On the basis of aggregately analyzing the tall fescue's growth requirement, soil water content and parts of meteorological dates, the result was gained, that is the optimal irrigation amount of tall fescue is 12 mm.

Key words Green land, Precise irrigation, Control system, Optimal irrigation amount, Dual-layer composite soil water content sensor

引言

随着社会的发展和人民生活水平的提高,绿地面积和绿地灌溉量也在不断提高,绿地用水总量在城市总耗水量中的比重越来越大。但其水资源利用率很低,用水管理粗放,灌溉方式和技术落后,普遍采用的“大水漫灌”不仅严重浪费水资源,还不利于绿地作物的生长^[1]。

精准灌溉采用现代信息电子技术和自动控制技术等,按照作物正常生长过程的需求,对作物进行精准灌溉,以确保作物正常生长的需要,同时实现节水灌溉^[2]。但目前精准灌溉控制系统的研究对象集中于大田系统,很少有关绿地的研究^[3];且在精准灌溉控制系统中,灌溉策略的实施多数是基于两点法测量土壤含水率,根据植被和土壤的具体情况在适当的深度分别埋置2个土壤水分传感器,这种做

收稿日期:2011-05-26 修回日期:2011-06-17

* 国家自然科学基金资助项目(30671715)和北京市教育委员会共建项目建设计划科学研究与科研基地建设项目(2008BJKY01)

作者简介:赵燕东,副教授,博士,主要从事智能检测与信号处理研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

法的缺点是效率低,测量误差大,能耗高;且国内外关于精准灌溉的研究中,实施灌溉的目的只是保障植被不缺水,没有考虑过量灌溉也会给植被带来负面效应。

因此,本文设计一种面向绿地、基于 GSM 无线通信的精准灌溉控制系统;研究精准灌溉控制系统两点法中两部分传感器的集成一体化,并应用在双路偏差灌溉控制策略中;同时,研究不同的灌溉量对绿地植被的影响,得出适合于绿地的最优灌溉量,实现真正意义上的精准灌溉。

1 控制系统

1.1 系统结构

绿地精准灌溉控制系统由双层复合土壤水分传感器阵、电磁阀阵、现场控制器、GSM MODEM 及远程监控计算机组成。现场控制器实时监测绿地土壤墒情,结合植物生长状况,作出精准灌溉决策。系统不仅能实时监测土壤墒情,同时还能实现工作人员对现场系统进行远程监控。系统结构如图 1 所示。

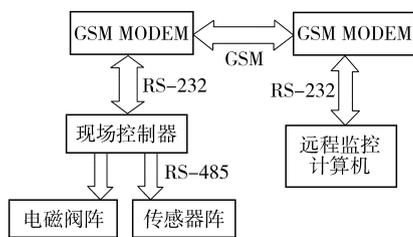


图 1 系统结构原理图

Fig. 1 Structure of system

1.2 系统功能

系统功能主要包括:①实时监测土壤墒情。②灌溉系统的自动控制、手动控制和定时控制。③根据土壤墒情判断作物生长状况,计算最优灌溉量,实施精准灌溉。④确保绿地植物根部土壤含水率稳定在设定值附近。⑤工作人员远程实时监控现场系统的运行。现场系统的错误报警。⑥双层复位土壤水分传感器的在线校正。⑦灌溉阈值、最优灌溉量等系统参数的远程设定。

1.3 现场控制器

现场控制器是系统的核心^[4],如图 2 所示。以 ATmega128 为 MCU 构成最小系统,带有 RS-485 接口,与组成网络的传感器进行通信。外扩 RS-232 接口,用于连接与上位机进行通信的 GSM 模块。电源部分为控制器和传感器进行单独供电,保证系统稳定可靠运行。DS1302 保证时钟的精确性,继电器部分与电磁阀门连接,通过控制器控制阀门开关。

1.4 上位机软件

带有监控软件的远程计算机具有用户登录、采

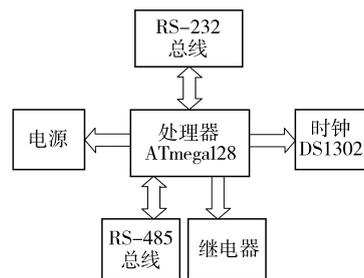


图 2 现场控制器框图

Fig. 2 Diagram of controller

集与控制、系统设置和数据管理等功能,是对控制器系统的优化^[5]。其框图如图 3 所示。用户登录可以修改用户密码或更改用户等。土壤含水率数据的采集方式有 3 种,其中实时采集步长最短可以设置为 2 min,定时采集可以设为 24 h 内的某些整点采集,手动采集用于测试系统的通信是否正常。传感器校正功能主要用于修改传感器的标定参数,以适应实际土壤类型。历史数据查询以及当前系统数据显示在数据管理模块查看,也可对重要数据进行备份。

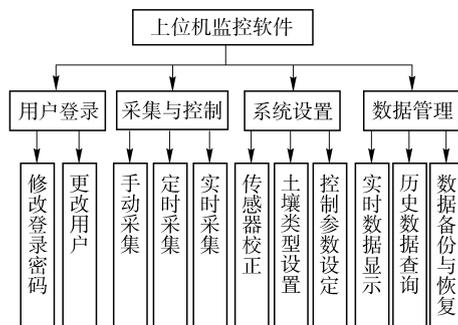


图 3 上位机软件功能框图

Fig. 3 Functional block diagram of upper monitor software

2 双层复合土壤水分传感器

2.1 原理

土壤含水率的检测方法主要有干燥称量法、张力计法、电阻法、中子法、介电常数法等^[6]。土壤是由土壤固相物质、水和空气 3 种电介质组成的混合物,而影响土壤介电常数的主要是含水率,通过测量土壤的介电常数即可达到测量土壤体积含水率的目的。基于驻波率(SWR)原理的土壤水分传感器就是根据这一原理设计而成的。这种传感器由 100 MHz 信号源、同轴传输线和不锈钢探头组成^[7]。信号源产生无线电波,此波沿着传输线传送到探头。由于探头的阻抗与传输线的阻抗不匹配,一部分信号将反射回来,在传输线上入射波与反射波叠加形成驻波,使传输线上各点的电压幅值存在变化,传输线两端的电压差为

$$\Delta U = 2A\rho = 2A \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

式中 A ——信号幅度 ρ ——反射系数
 Z_L ——探头阻抗,与含水土壤介电常数有关
 Z_0 ——传输线阻抗

而传输线上的驻波率可以表示为

$$\Gamma = \frac{1 - |\rho|}{1 + |\rho|} \quad (2)$$

这样,通过测量传输线上的波特率就可以达到测量土壤体积含水率的目的。

2.2 组成

双层复合土壤水分传感器由两组 100 MHz 信号源、50 Ω 同轴传输线、高频检测电路及环形探针组成,如图 4 所示。两组测试传感器可随系统要求安装不同的间距,分层布控在一个测量体内,实时检测两个层面的土壤墒情,以适应不同植被的生理需求要求。以高羊茅为例:土壤水分传感器 1 大约在地表土壤下 10 cm 处,土壤水分传感器 2 大约在 20 cm 处。

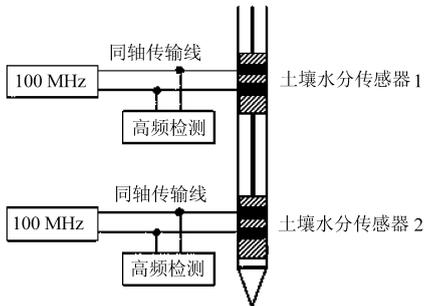


图 4 传感器组成示意图

Fig. 4 Composition diagram of sensor

2.3 标定与校正

该复合型土壤水分传感器测量的结果是与含水率对应的电压,在投入使用前,需要对其进行标定,得出电压与含水率之间定量的关系。这种关系与土壤类型、植物所需含水率范围等密切相关。以高羊茅为例,取其所在地的土壤若干,干燥后施以定量的水分,配成能表征其生长状况的含水率范围(0 ~ 50%)内具有代表的含水率,再测量出其对应的电压,如图 5、6 所示。

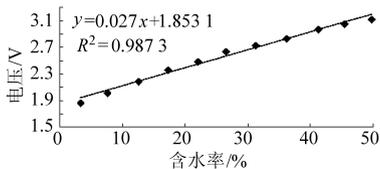


图 5 V_1 与含水率之间关系

Fig. 5 Relation of V_1 and water content

由图可以看出,在高羊茅正常生长所需水分的范围内(0 ~ 50%),电压与含水率大致呈单值线性关系,耦合度大于 97%。

2.4 优势

相比于传统的使用 2 个传感器的策略,采用双

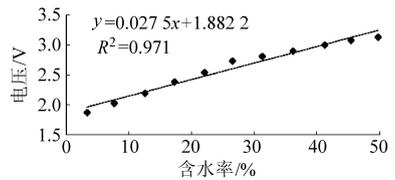


图 6 V_2 与含水率之间关系

Fig. 6 Relation of V_2 and water content

层复合土壤水分传感器发挥了集成一体化的优势,主要包括以下几方面:

(1) 可以按照要求随意调整两部分传感器的位置,以更好地适应土壤、植被的特点。

(2) 由于传感器内部电路的精巧设计,如共地等,可以使得测量结果更加精确,减小了误差。

(3) 相对于 2 个传感器的策略,集成一体化的设计复用一些公共的部分,节能、省电,尤其是在采用太阳能供电等对能耗要求比较严格的场合优点更加突出。

(4) 完全一体化的设计使得布局更加紧凑、整体感强、占用空间小、使用资源少。

(5) 双层土壤水分传感器的优势还体现在操作简便、易于维修等。

2.5 双路偏差灌溉控制策略

绿地以草坪草为主,主要根系较短,一般为 10 ~ 20 cm^[8]。采用双路偏差控制原理(图 7)制定灌溉策略,上层传感器测定值作为阀门打开的依据,下层传感器测定值作为阀门关闭的依据,具体表现为:当上层土壤含水率低于所设阈值时,打开阀门,进行灌溉,同时实时监测下层土壤含水率,当其变化超过设定的范围(2%)时,关闭阀门,结束灌溉。

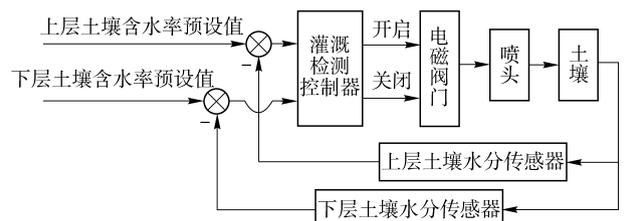


图 7 双路偏差灌溉控制原理图

Fig. 7 Diagram of dual-way bias irrigation control

双路偏差灌溉控制系统中,上层土壤水分传感器的阈值设定要求能及时反映植物缺水状况,而下层土壤水分传感器的测定值在灌溉前后基本保持稳定,既能满足植物正常的生长需要,又防止灌溉水继续向下渗透,避免过量灌溉,造成水资源浪费,以达到精准灌溉的目的^[9]。

3 最优灌溉量实验

3.1 实验条件

实验绿地位于北京市朝阳区北辰路,北接中四

环,长1 200 m,宽约75 m,植被主要以高羊茅草、矮灌木和国槐为主。由于灌溉面积大,植被种类繁多,地势与市政水源的管道结构较为复杂,而系统中所用的RS-485总线传输距离较短,在工程实施中,将整个灌溉区域分为6大区域,在每个区域中,根据水源、地势和植被情况又分为若干小区,每个小区植被单一,面积大概在200 m²左右,而这也为各个小区设定单一的灌溉阈值提供了可能。总体来说,整个项目分为54个灌溉小区,108个电磁阀,1 000多个喷头,4 000多个滴头,108组双层复合土壤水分传感器,6台现场灌溉控制器、3台系统通信控制器、1台上位机及其监控软件。

3.2 实验原理及方法

灌溉具有延迟效应,不同的环境,不同的植被,灌溉水渗透的大小和时间各不相同。渗透量与灌溉量呈线性关系^[10],过多的灌溉量会浪费水资源,造成水资源的利用低下;植被的生长状况则与灌溉量呈二次关系,正常范围的灌溉能促进植被的正常生长,但过量的灌溉反而适得其反;而且灌溉水应该充分考虑环境效益,过多的灌溉会造成渗透,带走肥料,污染地下水^[11]。

为得出适合绿地灌溉需要的最优灌溉量,以实验绿地为目标,将土壤作为一个被控系统,灌溉量作为系统的输入(激励),同时考虑系统的干扰(降水量),土壤含水率作为系统的输出(响应),分别研究单个激励和多个激励作用下,系统响应的变化。以某高羊茅植被小区为例,在2010年5月19日,测得该小区土壤10 cm含水率为23%(下限阈值)左右,选择5个区域分别埋设双位复合型土壤水分传感器,传感器按10 cm和20 cm分布,然后施以不同梯度(20、16、12、10、8 mm)的灌溉量,连续观测两个深度(10 cm和20 cm)的含水率,通过分析得出高羊茅植被的最优灌溉量。

为了验证在最优灌溉量下系统的正确运行,采用民族大道精准灌溉控制系统,为不同植被小区设置相应的最优灌溉量,同时配备气象观测仪,在2010年5月18日至2010年7月11日期间,每天的上午9时和下午4时连续检测该小区土壤墒情信息和降水量,并记录自动灌溉量。

3.3 实验结果及分析

实验以高羊茅草坪的土壤墒情为控制对象,根据高羊茅草的生理需水要求,结合北京地区土壤为粘壤土的特点,设定上层(10 cm)处的土壤含水率阈值为23%,下层(20 cm)处的土壤含水率变化阈值为2%,实施精准灌溉控制。

(1) 由于篇幅限制,无法展现全部激励(20、

16、12、10、8 mm)作用图,同时为了较好说明实验结论,只阐述具有代表性的激励对土壤墒情的影响。单个激励(16、12、8 mm灌溉量)对土壤墒情的影响如图8所示。

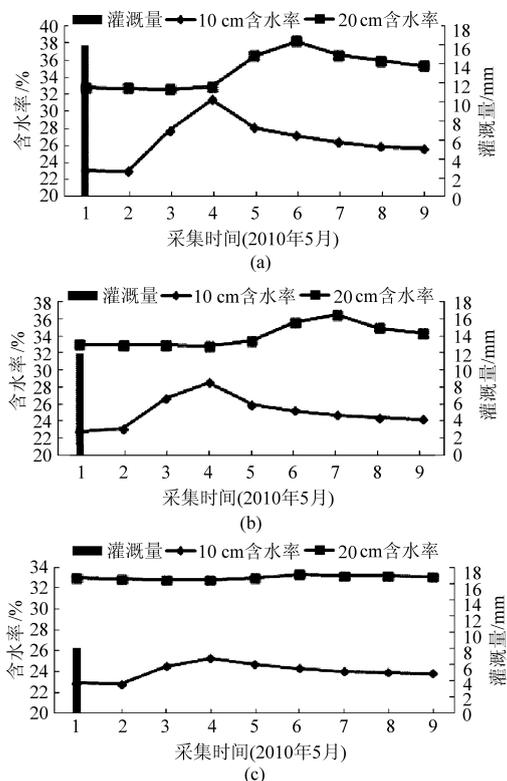


图8 不同灌溉量下含水率对比

Fig. 8 Diagram of water content of different irrigation amounts

(a) 16 mm (b) 12 mm (c) 8 mm

由图8a可以看出:在大激励(灌溉量为16 mm)作用下,10 cm处的土壤含水率变化明显,同时引起20 cm处土壤含水率的变化大大超出设定阈值(2%)。

由图8b可以看出:在中等激励(灌溉量为12 mm)作用下,10 cm处的土壤含水率变化明显,且引起20 cm处土壤含水率的变化刚好超出设定阈值(2%)。

由图8c可以看出:在小激励(灌溉量为8 mm)的作用下,上层土壤含水率缓慢上升,但下层土壤含水率则没有明显的变化。说明由于植物根部吸水作用、土壤对水的束缚作用以及蒸腾作用等的影响,小激励对土壤墒情的影响主要集中在20 cm以上,不能满足高羊茅草大部分根区吸水的要求。

由以上实验结果可知:过大的激励虽然能满足上层土壤含水率的要求,但过多的渗透到20 cm以下,容易造成积水或向下渗透,引起植被根部腐烂或浪费水资源;而过小的激励不能下渗到大部分根区,不满足植物生理需水的要求;只有中等激励(12 mm

灌溉量)不仅能满足高羊茅草的生理需水要求,而且保证了水下渗至 20 cm 处,不再过多灌溉,避免了水资源和肥料的浪费。因此在制定最优灌溉量时应该考虑中等激励(12 mm 左右)。

(2) 2 个多月(2010 年 5 月 18 日至 2010 年 7 月 11 日)中土壤墒情与灌溉量、降水量的关系如图 9 所示。

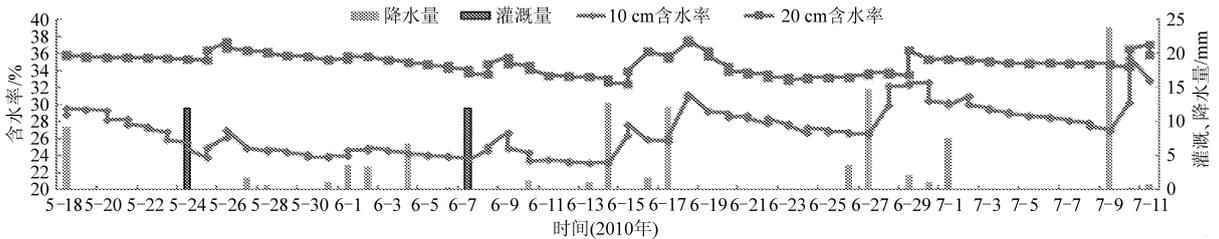


图 9 降水、灌溉作用下含水率对比

Fig. 9 Diagram of water content of rainfall and irrigation

根据不同植物根系分布情况和其对土壤水分的要求,通过此实验方法,可以确定双层复合土壤水分传感器的结构、埋深及最优灌溉量。

4 结论

(1) 设计了一种面向绿地的精准灌溉控制系统,该系统能根据土壤墒情及植被生长状况对植被实施精准灌溉,同时工作人员可以通过 GSM 远程监控系统。

(2) 设计了双层复合土壤水分传感器,相比于两个传感器的策略,该策略具有操作简便、测量精度

由图 9 可知:10 cm 处土壤含水率对降水和灌溉反应明显,但由于草坪草吸水作用、土壤对水的束缚作用及蒸腾作用等,只有达到有效灌溉量(12 mm 以上)的降水和灌溉才能使有效水到达 20 cm 处,满足大部分根区土壤含水率的要求。系统在有效灌溉量的作用下可使 20 cm 处的土壤含水率保持在相对稳定的湿度附近,保证高羊茅草的正常生长。

高、能耗低等优点。结合高羊茅草的生理需水状况,确定了该环境下双层复合土壤水分传感器的层距为 10 cm,上层土壤水分传感器埋深为地下 10 cm,使高羊茅草的主要根区在两个传感器之间,确保土壤水为高羊茅草提供必需的水分。该土壤水分传感器所测量的电压值在高羊茅正常生长的含水率范围内与含水率呈单值线性关系。

(3) 通过实验,在综合分析土壤墒情和部分气象资料的基础上,得出适合高羊茅草的最优灌溉量为每次 12 mm 左右,既保证了高羊茅草生理需水,又可防止水资源、肥料的浪费。

参 考 文 献

- 刘洪禄,吴文勇,郝仲勇. 绿地综合节水技术体系探讨[J]. 北京水利,2003(6): 9~10.
- 宁辉. 精确灌溉技术现状及未来发展[J]. 东北水利水电,2010(2): 60~62.
- 章军富,陈峻崎,胡剑非,等. 基于 GPRS/SMS 和 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 的绿地精准灌溉控制系统[J],农业工程学报,2009, 25(9): 1~3.
Zhang Junfu, Chen Junqi, Hu Jianfei, et al. Control system of urban green land precision irrigation based on GPRS/SMS and $\mu\text{C}/\text{OS}$ embedded technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 1~3. (in Chinese)
- 彭曾瑜,赵燕东. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的土壤水分实时监测系统[J]. 北京林业大学学报,2010,32(6):114~116.
Peng Zengyu, Zhao Yandong. A monitoring system of real-time soil water content based on $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ operating system[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 114~116. (in Chinese)
- 江挺,胡培金,赵燕东. 基于 ZigBee 无线传感器网络的灌溉控制系统设计[J]. 节水灌溉,2011(2):60~61.
- Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electro-magnetic determination of soil water content using TDR (I): applications to wetting fronts and steep gradients [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1982, 46(4): 672~678.
- 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤水分传感器的测量灵敏度分析[J]. 农业工程学报,2002,18(2):5~8.
Zhao Yandong, Wang Yiming. Analysis of sensitivity of soil moisture measurement based on standing-wave ratio [J]. Transactions of the CSAE,2002, 18 (2): 5~8. (in Chinese)
- 匡秋明,赵燕东,白陈祥. 节水灌溉自动控制系统的研究[J]. 农业工程学报,2007, 23(6): 136~139.
Kuang Qiuming, Zhao Yandong, Bai Chenxiang. Automatic monitor and control system of water saving irrigation [J]. Transactions of the CSAE,2007, 23(6): 136~139. (in Chinese)

- 6 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2):1~5.
Xu Ying, Chen Yaxin, Shi Haibin, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2):1~5. (in Chinese)
- 7 刘继龙, 马孝义, 张振华. 土壤入渗特性的空间变异性及土壤转换函数[J]. 水科学进展, 2010, 21(2):214~221.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil infiltration characteristics and its pedotransfer functions [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 214~221. (in Chinese)
- 8 刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 46~52.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1):46~52. (in Chinese)
- 9 Bayat H, Neyshabouri M R, Mohammadi K, et al. Estimating water Rretention with pedotransfer functions using multi-objective group method of data handling and ANNs [J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 107~114.
- 10 Merdun H, Ç1nar Ö, Ramazan M, et al. Comparison of artificial neural network and regression pedotransfer functions for prediction of soil water retention and saturated hydraulic conductivity [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1~2):108~116.
- 11 Børgesen C D, Schaap M G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils [J]. Geoderma, 2005, 127(1~2):154~167.
- 12 Givi J, Prasherb S O, Patel R M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point [J]. Agricultural Water Management, 2004, 70(2):83~96.
- 13 Santra P, Das B S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India [J]. Geoderma, 2008, 146(3~4): 439~448.
- 14 Li Y, Chen D, White R E, et al. Estimating soil hydraulic properties of Fengqiu county soils in the northChina plain using pedo-transfer functions [J]. Geoderma, 2007, 138(3~4):261~271.
- 15 van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1980, 44(5):892~898.
- 16 王军, 邱扬. 土地质量的空间变异与尺度效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, 24(4):28~35.
Wang Jun, Qiu Yang. Review on spatial variability and scale effects of land quality [J]. Progress in Geography, 2005, 24(4): 28~35. (in Chinese)
- 17 郭丽俊, 李毅, 李敏, 等. 壤土土壤水力特性空间变异的多重分形分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9):50~58.
Guo Lijun, Li Yi, Li Min, et al. Multifractal study on spatial variability of soil hydraulic properties of lou soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9):50~58. (in Chinese)

(上接第 50 页)

- 9 李文华, 刘广权, 马松涛, 等. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水和生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 61~65.
Li Wenhua, Liu Guangquan, Ma Songtao, et al. Effect of drought stress on transpiration and growth characteristics of young plant [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science edition; 2004, 32(1): 61~65. (in Chinese)
- 10 安巧霞, 孙三民, 叶含春. 考虑环境效益的塔里木灌区棉花最优灌溉量[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):49~53.
An Qiaoxia, Sun Sanmin, Ye Hanchun. Optimal irrigation amount for cotton field considering environmental benefits in Tarim irrigation area [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 49~53. (in Chinese)
- 11 高凯, 朱铁霞, 郭志杰, 等. 不同灌水处理对高羊茅草坪蒸散量和光合特性的影响[J]. 内蒙古民族大学学报:自然科学版, 2007, 22(4): 404~405.
Gao Kai, Zhu Tiexia, Guo Zhijie, et al. Effect of different irrigation treatments on ET and photosynthetic characteristic of festuca arundinace turf [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities: Natural Science Edition, 2007, 22(4): 404~405. (in Chinese)