

温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型*

郑健¹ 蔡焕杰² 王健² 王燕¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 应用多层次多目标模糊理论与方法, 建立调亏灌溉综合效益多层次多目标模糊评价模型; 利用信息熵理论求得各层评价指标客观熵权, 结合专家法的主观权重获得模型各层评价指标综合权重, 并运用该模型对2007年秋季温室小型西瓜不同亏水处理的综合效益进行评价, 结果表明, 在西瓜果实膨大期进行水分亏缺处理可以一定程度上提高果实的品质, 但重度和中度的水分亏缺会降低果实产量, 在果实成熟期采用一定程度的水分亏缺对果实品质和产量影响不大, 在苗期、开花坐果期、果实膨大期和果实成熟期分别采用 $0.75E_p$ 、 $0.75E_p$ 、 $1.25E_p$ 和 $1.00E_p$ 的灌溉标准可以获得较为理想的调亏灌溉综合效益。

关键词: 小型西瓜 调亏灌溉 综合效益 评价模型 信息熵

中图分类号: S651; S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0124-06

Fuzzy Evaluation to Integration Benefit of Regulated Deficit Irrigation of Mini-watermelon Based on Information Entropy

Zheng Jian¹ Cai Huanjie² Wang Jian² Wang Yan¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

The multi-hierarchy and multi-objective fuzzy theory was applied to establish a multi-hierarchy and multi-objective fuzzy evaluation model of regulated deficit irrigation comprehensive benefits. Using the information entropy theory, the impersonality weights of all hierarchy evaluation indexes were obtained, and the subjective weights given by experts to attain the comprehensive weights for the method of multi-hierarchy evaluation indexes were combined, the reliability of the model evaluation results was improved. At the same time, the model was used to evaluate and order the comprehensive benefits of regulate deficit irrigation integration benefits of mini-watermelon with different water deficit treatments in autumn of 2007. The results indicate that the water deficit can improve fruit quality, but the serious water deficit and moderate water deficit would decrease yield in fruit spreading growth stage. The water deficit has little influence on yield and quality of fruit in fruit maturing stage. During the seeding stage, blossoming and bearing fruits stage, fruit spreading growth stage and fruit maturing stage, the irrigation standard of $0.75E_p$, $0.75E_p$, $1.25E_p$ and $1.00E_p$ was adopted respectively, and could get the perfect comprehensive benefits of regulate deficit irrigation integration benefits.

Key words Mini-watermelon, Regulated deficit irrigation, Integration benefit, Evaluation model, Information entropy

收稿日期: 2010-09-03 修回日期: 2010-12-15

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA100202)和兰州理工大学博士基金资助项目(0906ZXC121)

作者简介: 郑健, 讲师, 博士, 主要从事农业节水和水资源高效利用研究, E-mail: zhj16822@126.com

通讯作者: 蔡焕杰, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水和水资源高效利用研究, E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

引言

调亏灌溉 (regulate deficit irrigation, 简称 RDI) 作为一种重要的生理节水技术^[1], 自提出以来在作物上进行了大量研究, 结果表明, RDI 可在显著节约灌溉用水的同时, 使果实产量不降低或略有增产, 果实品质明显改善, 并使水分利用效率 (water use efficiency, 简称 WUE) 与经济效益 (economic benefit, 简称 EB) 大幅提高^[2-9]。温室 RDI 技术对水分亏缺实施的生育期、亏缺程度与亏缺持续时间都有较高要求, 且不同的调亏程度对果实产量、品质、WUE 和 EB 的影响明显不同, 即使同一亏水处理, 对以上指标的影响差异也较大, 这给最佳 RDI 技术的优选与推广造成一定影响。传统评价方法主要采用综合分析法, 即通过单项指标的比较以及各指标之间的因果关系或相关性, 进行评价分析。不同因子的影响程度 (即权重), 主要由研究者根据经验进行评判, 必然受到研究者主观性的影响。尤其是不同处理间各指标之间差异不显著时, 对于相近的试验结果, 不同专家可能得出不同的结论, 即评价结果具有某种程度的不确定性, 从而可能对最佳土壤水分控制指标的确定产生不利影响^[10]。所以借助数学原理建立合理的 RDI 综合评价模型, 使其能够包含不同水分调亏处理对植物性状、产量、品质、WUE 和 EB 的所有影响信息, 以便对温室调亏灌溉综合效益进行科学评价, 进而优选出最佳 RDI 方案就具有重要意义。

信息熵 (information entropy) 作为一种度量不确定性方法的重要理论得到了广泛应用, 利用信息熵来计算指标的权重可为多指标综合评价提供重要的客观依据^[11]。国内外研究者将信息熵理论应用于农业水管理以及其他领域的研究已取得大量成果^[12-15], 但对 RDI 条件下综合考虑不同亏水处理对植株性状、果实产量、品质、WUE 和 EB 的影响研究还较少, 同时将信息熵理论应用到 RDI 综合评价的研究尚无报道。本文通过构建基于信息熵的温室小型西瓜综合效益评价模型, 优选最佳调亏灌溉方案。

1 试验

1.1 试验材料

试验在西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室的日光温室内进行。温室结构为房脊型, 长 36 m, 宽 10.3 m, 高 4 m, 位于东经 108°04', 北纬 34°20', 所处地理位置属半干旱偏湿润区, 年均日照时数 2 163.8 h, 无霜期 210 d。温室内设有自动气象观测站, 可对温室内的常规气象资料进行监测。

试验地土壤为壤土, 其中粒径 0.05 ~ 1.00 mm 砂粒的质量分数为 27%, 粒径 0.05 ~ 0.005 mm 的粉砂颗粒为 30%, 粒径小于等于 0.005 mm 的粘粒为 43%。按照中国土壤分类标准, 该试验地土壤属于粘质壤土。1 m 土层内土壤平均容积密度为 1.39 g/cm³, 田间持水量为 23.5% (质量), 体积饱和和含水率为 49.2%。种植前测得土壤有机质含量为 1.97 g/kg, 全磷含量为 1.37 g/kg, 全氮含量为 0.96 g/kg, 全钾含量为 20.39 g/kg, 各处理施肥量及施肥时间一致, 不考虑施肥产生的差异。

试验材料为小型西瓜“黑美人”, 属于小型早熟西瓜种。2007 年 08 月 26 日定植, 定植后覆膜, 2007 年 11 月 27 日试验结束。垄间距 100 cm, 株距为 40 cm, 密度为 25 000 株/hm²。由于天气情况, 在秋季定植时西瓜幼苗略大于四叶一心, 春茬定植时西瓜幼苗为三叶一心。温室小型西瓜是一种耗水量较大的作物, 因此在制定灌水定额时尽量不令其发生重度亏水。

1.2 试验设计与布置

试验采用膜下滴灌, 一条毛管控制一行作物, 毛管长度与小区垄长相同。试验设置在西瓜不同生育阶段采用不同灌溉水量, 灌溉水量采用 E601 型蒸发器的蒸发量值控制, 以每天 8:00 测定的蒸发量数值为灌溉标准, 灌溉频率为 1 次/d, 蒸发器安置在温室内。计算方法为^[16]

$$M = K_p S E_p \quad (1)$$

式中 M ——灌溉水量, mL

K_p ——作物-蒸发皿系数

S ——单个滴头控制面积, cm², 在本研究中为 2 000 cm² (40 cm × 50 cm)

E_p ——两次灌水时间间隔内的蒸发皿蒸发量, mm

试验设置如表 1 所示, 其中 1.25、1.00、0.75、0.50 为作物-蒸发皿系数 K_p 取值, 每处理设置 3 个重复, 为防止各小区间水分相互渗透, 相邻小区间用埋深 60 cm 的塑料膜隔开。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株性状指标

试验结束时, 从各处理中取具有代表性植株 3 株的地面以上高度为株高, 所有茎节粗的平均值为茎粗。根系干质量、地上部分干质量的测定: 将取样的西瓜植株从茎基部剪下, 获得完整的冠部, 然后将植物地上各部分分开后, 擦拭表面尘污后立即称其鲜质量, 根系取样面积为植株周围 40 cm × 40 cm, 取样深度根据根系生长而定, 尽量取到以肉眼看不见细毛根为止, 然后将其浸泡在盆中, 到土柱变得松散

时冲洗根系,将地上各部分与根系分别放入信封内,在 105 ℃ 干燥 30 min 杀青,并在 75 ℃ 下干燥至恒质量,用 1/100 电子天平称取干质量。

表 1 温室小型西瓜灌溉试验灌水方案

Tab.1 Irrigation scheme of mini-watermelon growing in the greenhouse

| 处理 | 苗期 | 开花坐果期 | 果实膨大期 | 成熟期 |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| T1 | 1.25E _p | 1.25E _p | 1.25E _p | 1.25E _p |
| T2 | 1.25E _p | 1.00E _p | 1.00E _p | 1.00E _p |
| T3 | 1.25E _p | 0.75E _p | 0.75E _p | 0.75E _p |
| T4 | 1.25E _p | 0.50E _p | 0.50E _p | 0.50E _p |
| T5 | 1.00E _p | 1.25E _p | 1.00E _p | 0.75E _p |
| T6 | 1.00E _p | 1.00E _p | 1.25E _p | 0.50E _p |
| T7 | 1.00E _p | 0.75E _p | 0.50E _p | 1.25E _p |
| T8 | 1.00E _p | 0.50E _p | 0.75E _p | 1.00E _p |
| T9 | 0.75E _p | 1.25E _p | 0.75E _p | 0.50E _p |
| T10 | 0.75E _p | 1.00E _p | 0.50E _p | 0.75E _p |
| T11 | 0.75E _p | 0.75E _p | 1.25E _p | 1.00E _p |
| T12 | 0.75E _p | 0.50E _p | 1.00E _p | 1.25E _p |
| T13 | 0.50E _p | 1.25E _p | 0.50E _p | 1.00E _p |
| T14 | 0.50E _p | 1.00E _p | 0.75E _p | 1.25E _p |
| T15 | 0.50E _p | 0.75E _p | 1.00E _p | 0.50E _p |
| T16 | 0.50E _p | 0.50E _p | 1.25E _p | 0.75E _p |

1.3.2 品质指标

采用 WAY-2S 型阿贝折射仪测定小型西瓜果实中的可溶性固形物含量;用钼蓝比色法、考马斯亮蓝 G-250 染色法、滴定法分别测定小型西瓜果实的维生素 C、可溶性蛋白和有机酸含量^[17]。

1.3.3 产量指标

试验结束时,各处理分别选取 3 株代表性植株测定其单株产量,取算术平均值为计算值。各处理每株产量之和为总产量。

1.3.4 水分利用效率指标

植株耗水量采用水量平衡法测定

$$E_{Tc} = R + I - F \pm Q + \Delta W \quad (2)$$

式中 E_{Tc} ——作物耗水量,mm

R ——降水量,mm,温室内无降水,故 $R=0$

I ——生育期内灌水量,mm

F ——地表径流,考虑到小区试验期间无地表径流发生,此处取 $F=0$

Q ——上移或下渗量,mm,采用膜下滴灌相临深度处土壤水分变化不明显,故取 $Q=0$

ΔW ——土壤贮水量的减少量,mm

每行每隔 5~7 d 用自制土钻在各处理的作物根部附近分层(每层 10 cm)取 0~60 cm 土壤,采用干燥法测定每行的土壤含水率求得 ΔW ,计算采用

0~60 cm 的平均含水率。

植株水分利用效率

$$W_{ET} = Y/E_{Tc} \quad (3)$$

式中 Y ——各处理西瓜的总产量,kg/hm²

灌溉水利用效率

$$W_I = Y/I \quad (4)$$

1.3.5 经济效益指标

根据不同亏水处理西瓜采摘期实际市场价格与产量计算毛经济效益,各处理扣除灌溉水费、劳力投入(修剪、疏花疏果、灌溉人工费等)及其他投入(肥料、农药等)得到净经济效益。

2 基于信息熵的综合效益评价模型

2.1 评价层次结构和指标体系的构建

考虑指标反映的内涵及其指示程度,在温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价体系中,选取植株性状、产量、水分利用效率(WUE)、品质(通过实际调查并结合主成份分析与聚类分析结果,优选出了具有代表性的 4 项主要指标)与经济效益 5 个方面 14 项指标构建温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价体系,并建立它们之间的层次结构,如表 2 所示。

表 2 小型西瓜调亏灌溉综合效益评价结构

Tab.2 Integration benefit evaluated frame to regulated deficit irrigation of mini-watermelon

| 第 1 层 | 第 2 层 | 第 3 层 |
|------------------|--------|----------|
| 西瓜调亏灌溉 综合效益评价 | 植株性状 | 株高 |
| | | 茎粗 |
| | | 地上部干质量 |
| | | 根系干质量 |
| | | 可溶性固形物 |
| | | 可溶性蛋白 |
| | 品质 | 维生素 |
| | | 有机酸 |
| | | 单株产量 |
| | | 总产量 |
| | 产量 | 植株水分利用效率 |
| | | 灌溉水利用效率 |
| | 水分利用效率 | 毛效益 |
| | | 净效益 |
| 经济效益 | | |
| | | |

2.2 评价模型的建立

(1) 设定多目标决策问题的方案集和目标集,建立评价指标的决策特征矩阵,根据越大越优型和越小越优型将目标值转化为指标隶属度矩阵。

(2) 将指标隶属度矩阵中每一行的最大值和最小值抽出,建立最优模糊划分矩阵。

(3) 设立评价指标加权向量, 根据方案的欧氏加权距优距平方与欧氏加权距劣距平方之和最小准则, 推求各方方案对优等方案的相对隶属度最优值, 建立目标函数。

(4) 对目标函数求导, 且令导数为零, 获得温室小型西瓜亏缺灌溉综合效益模糊评价模型。其中, 评价指标的加权向量需要通过熵权法和专家评分法综合确定。计算不同方案的相对优属度, 并将其进行排序。优属度越大, 则亏缺灌溉方案越接近相对较优方案。

2.3 信息熵权重及综合权重的确定

在信息论中, 熵是系统无序状态的度量。熵权, 反映了各指标向决策者提供的有用信息量。对于可行的 n 个方案, 依据不同具体数据的变异程度, 可根据熵的思想来度量 m 个评价指标的信息效用值, 从而确定各指标的熵权。同时, 为解决过去熵值处于某一区间时, 其所传递的信息与熵权大小不一致的不足, 本文采用改进的熵权计算式^[14]。

评价指标的综合权重为信息熵权重(客观权重)与专家法权重(主观权重)的结合。客观权重反映了方案集中具体数据对决策的贡献度。主观权重由 10 位相关专家对每层的评价指标给出专家权重, 然后将各项指标专家权重进行归一化处理得到主观权, 主观权重体现了专家经验的影响。所以, 第 i 个指标的综合权重 ε_i 定义为

$$\varepsilon_i = \omega_i \omega_{pi} \quad (0 \leq \omega_{pi} \leq 1; 0 \leq \omega_i \leq 1; i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中 ω_{pi} ——评价指标 i 的专家权重

ω_i ——评价指标 i 的信息熵权重

2.4 多层次多目标系统模糊优选法

设系统共分解为 M 层(本文 $M = 3$), 若第 3 层(最底层)有 m 个评价指标(本文 $m = 14$), 具体优选方法如下:

(1) 对基本指标矩阵进行归一化处理, 获得各指标相对优的相应隶属度矩阵。

(2) 根据文献[14]和专家法进行熵权和专家权计算, 采用式(5)计算指标 i 的综合权重。

(3) 将综合权重和隶属度矩阵相应元素代入温室小型西瓜亏缺灌溉综合效益模糊评价模型, 求得本层的相对优属度矩阵。

(4) 重复步骤(1)~(3), 获得更高一层的优属度矩阵, 直到最高层结束, 得到最高层单元系统输出, 即决策或方案的优属度向量。

3 综合评价模型的应用分析

根据 2007 年秋季的试验资料, 运用上述基于信

息熵理论的多层次多目标模糊评价模型, 对其进行初步分析评价。由于温室小型西瓜综合评价指标系统分解为 3 个层次, 计算从第 3 层(最底层)开始, 首先对第 3 层各系统的评价指标利用熵值法计算其各自的权重, 再利用求出的各指标权重结合多目标模糊优选模型计算单元系统的决策优属度向量, 计算得到决策优属度向量后用多层次多目标系统模糊优选方法计算更高层次的决策优属度, 依此类推, 计算得到的各层次决策优属度, 如表 3 和表 4 所示。

表 3 第 2 层决策优属度

Tab.3 Decision-making membership degree of the second level

| 处理 | 植株性状 | 品质 | 产量 | 水分利用效率 | 经济效益 |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| T1 | 0.553 6 | 0.347 4 | 0.880 9 | 0.120 5 | 0.479 4 |
| T2 | 0.484 3 | 0.117 9 | 0.751 4 | 0.447 6 | 0.218 7 |
| T3 | 0.396 3 | 0.179 7 | 0.240 6 | 0.348 4 | 0.395 7 |
| T4 | 0.237 4 | 0.132 0 | 0.048 5 | 0.468 7 | 0.491 5 |
| T5 | 0.477 2 | 0.313 7 | 0.076 5 | 0.015 0 | 0.418 6 |
| T6 | 0.522 2 | 0.336 1 | 0.390 5 | 0.108 3 | 0.336 9 |
| T7 | 0.864 4 | 0.920 1 | 0.081 0 | 0.204 3 | 0.456 0 |
| T8 | 0.667 8 | 0.503 0 | 0.050 9 | 0.014 7 | 0.491 3 |
| T9 | 0.167 7 | 0.265 8 | 0.005 0 | 0.034 7 | 0.478 3 |
| T10 | 0.561 3 | 0.373 0 | 0.041 7 | 0.170 6 | 0.496 9 |
| T11 | 0.316 2 | 0.519 3 | 0.898 9 | 0.879 0 | 0.983 0 |
| T12 | 0.238 6 | 0.238 9 | 0.025 1 | 0.047 0 | 0.493 0 |
| T13 | 0.011 3 | 0.463 2 | 0.003 0 | 0.066 0 | 0.470 3 |
| T14 | 0.037 0 | 0.258 7 | 0.030 0 | 0.023 1 | 0.475 6 |
| T15 | 0.077 0 | 0.208 6 | 0.001 5 | 0.038 3 | 0.485 8 |
| T16 | 0.065 0 | 0.163 7 | 0.023 8 | 0.002 6 | 0.472 2 |

表 4 温室小型西瓜最终目标决策优属度

Tab.4 Final decision-making membership degree of mini-watermelon in greenhouse

| 处理 | 决策优属度 | 处理 | 决策优属度 |
|----|---------|-----|---------|
| T1 | 0.121 8 | T9 | 0.013 3 |
| T2 | 0.261 3 | T10 | 0.069 6 |
| T3 | 0.062 6 | T11 | 0.552 4 |
| T4 | 0.039 3 | T12 | 0.019 0 |
| T5 | 0.047 6 | T13 | 0.020 3 |
| T6 | 0.176 1 | T14 | 0.018 1 |
| T7 | 0.141 6 | T15 | 0.018 5 |
| T8 | 0.086 5 | T16 | 0.016 3 |

通过对表中数据分析可以看出:

(1) 在西瓜的苗期和开花坐果期采用低水量会对西瓜主蔓的生长造成较为严重的抑制, 且影响的

程度随着亏水程度的加重而增大,但在苗期的适度亏水有利于复水后西瓜的干物质和产量的形成。

(2) 品质指标的形成阶段有所不同,在果实膨大期采用 $1.25E_p$ 处理能获得较好的果实硬度;但在该阶段采用一定水分亏缺可以提高西瓜的可溶性固形物含量,而在开花坐果期经历水分亏缺处理不利于可溶性固形物含量的提高;坐果-膨大阶段水分亏缺对维生素 C 含量的影响可能是全生育期中最大的;而在开花坐果期和果实膨大期,水分亏缺可有效提高植株果实中有机酸的含量^[18]。

(3) 就整个生育期而言,在苗期和开花坐果期采用 $0.75E_p$ 的灌水量,在膨大期提高到 $1.25E_p$ 的灌水量(T11 处理),不仅可以获得最高的产量,同时也达到了最高的水分利用效率。在开花坐果期、果实膨大期和成熟期均采用 $0.5E_p$ 灌溉水量的 T4 处理,西瓜植株受到严重的干旱胁迫,使其营养生长和生殖生长受到抑制,虽然水分利用效率较高,但其产量远低于其他处理,这样的高效用水在生产实践中没有任何意义。整个生育期采用 $1.25E_p$ 灌溉水量的 T1 处理,虽然获得了较高的产量,但这是以大的耗水量为代价换来的,最终使得水分利用效率较低,这不但浪费水资源,同时也容易导致作物病虫害的发生,不利于温室小型西瓜的生长。因此,从水分亏缺对作物产量和品质的影响及作物的水分利用效率方面分析,温室小型西瓜在苗期、开花坐果期、果

实膨大期和果实成熟期分别采用 $0.75E_p$ 、 $0.75E_p$ 、 $1.25E_p$ 和 $1.00E_p$ 为灌溉标准的 T11 处理,可以实现作物高产和水分利用效率的高效、统一,而且从所建的温室小型西瓜综合评价模型中也可以直观反映,说明本文所建模型具有较好的合理性和可靠性。

本文的优化方案是在特定的土壤条件、施肥条件下的计算结果,在不同的地域其品种、土壤、农艺措施和环境等条件均有所不同,可采用本文所建模型进行计算分析,对方案进行适时调整,从而获得不同地区适宜的优化方案。

4 结束语

利用多层次多目标模糊理论与方法,建立了调亏灌溉综合效益多层次多目标模糊评价模型;利用信息熵理论求得各层评价指标客观熵权,结合专家法的主观权重获得了模型各层评价指标综合权重,与传统模型相比提高了模型评价结果的可靠性,并运用该模型对 2007 年秋季温室小型西瓜不同亏水处理的综合效益进行评价。结果表明,在西瓜果实膨大期进行水分亏缺处理可以一定程度上提高果实的品质,但重度和中度的水分亏缺会降低果实产量,在果实成熟期采用一定程度的水分亏缺对果实品质和产量影响不大,在苗期、开花坐果期、果实膨大期和果实成熟期分别采用 $0.75E_p$ 、 $0.75E_p$ 、 $1.25E_p$ 和 $1.00E_p$ 的灌溉标准可以获得较为理想的调亏灌溉综合效益。

参 考 文 献

- 刘晓英,罗远培. 干旱胁迫对作物生长后效影响的研究现状[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(4):6~9.
Liu Xiaoying, Luo Yuanpei. Present situation of study on after-effect of water stress on crop growth [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4):6~10. (in Chinese)
- Yesim Erdem, Nedim Yuksel A. Yield response of watermelon to irrigation shortage [J]. Scientia Horticulturae, 2003, 98(4): 365~383.
- Al-omrana A M, Shetaa A S, Falatah A M, et al. Effect of drip irrigation on squash (*Cucurbita pepo*) yield and water-use efficiency in sandy calcareous soils amended with clay deposits [J]. Agricultural Water Management, 2005, 73(1): 43~55.
- Costa J M, Maria F O, Chaves M. Deficit irrigation as a strategy to save water: physiology and potential application to horticulture [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10):1421~1434.
- Ahmed C B, Rouina B B, Boukhris M. Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia [J]. Scientia Horticulturae, 2007, 113(3):267~277.
- Cui Ningbo, Du Taisheng, Kang Shaozhong, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4):489~497.
- Cui Ningbo, Du Taisheng, Li Fusheng, et al. Response of vegetative growth, fruit development and water use efficiency to regulated deficit irrigation at different growth stages of pear-jujube tree[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(8): 1237~1246.
- 常莉飞,邹志荣. 调亏灌溉对温室黄瓜生长发育·产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(23):7142~7144.
Chang Lifei, Zou Zhirong. Effects of regulated deficit irrigation (RDI) on the growth, yield and quality of greenhouse cucumber [J]. Journal of Anhui Agri. Sci., 2007, 35(23):7142~7144. (in Chinese)
- 马福生,康绍忠,王密侠,等. 调亏灌溉对温室梨枣树水分利用效率与枣品质的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(1): 37~43.

- Ma Fusheng, Kang Shaozhong, Wang Mixia, et al. Effect of regulated deficit irrigation on water use efficiency and fruit quality of pear-jujube tree in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1):37~43. (in Chinese)
- 10 郭相平,刘展鹏,王青梅,等. 利用投影寻踪分类模型评价玉米旱后生理补偿效应[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6):22~25.
Guo Xiangping, Liu Zhanpeng, Wang Qingmei, et al. Comprehensive evaluation on compensatory effects of rewatering after PEG stress based on PPC-RAGA model [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6):22~25. (in Chinese)
- 11 邱苑华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- 12 Walker R. Entropy and the evaluation of labor market interventions [J]. Evaluation, 2007, 13(2):193~219.
- 13 Lall A, Sekar V, Ogihara M, et al. Data streaming algorithms for estimating entropy of network traffic [J]. Performance Evaluation Review, 2006, 34(1):145~156.
- 14 周惠成,张改红,王国利. 基于熵权的水库防洪调度多目标决策方法及应用[J]. 水利学报,2007,38(1):100~106.
Zhou Huicheng, Zhang Gaihong, Wang Guoli. Multi-objective decision making approach based on entropy weights for reservoir flood control operation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1):100~106. (in Chinese)
- 15 李慧伶,王修贵,崔远来,等. 灌区运行状况综合评价的方法研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):544~449.
Li Huiling, Wang Xiugui, Cui Yuanlai, et al. Comprehensive evaluation methods for irrigation district [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4):543~548. (in Chinese)
- 16 郑健,蔡焕杰,王健,等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J]. 农业工程学报,2009,25(10):30~34.
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Path analysis of yield components and water production function of watermelon in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10):30~34. (in Chinese)
- 17 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 北京:世界图书出版公司,2000.
- 18 郑健. 温室小型西瓜高用水机理及灌溉模式研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2009.
Zheng Jian. Research on high efficient water use mechanism and irrigation model of mini-watermelon in greenhouse [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009. (in Chinese)

(上接第85页)

参 考 文 献

- 1 康跃虎. 微灌系统水力学解析和设计[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1999.
- 2 Kang Y H, Nishiyama S, Kawano H. A simple method of designing uniform-water-application drip irrigation system [J]. Journal of JSIDRE, 1995, 63(2):33~41.
- 3 Keller J, Bliesner R D. Sprinkle and trickle irrigation [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- 4 Wu I P, Gitlin H M. Energy gradient line form drip irrigation laterals [J]. ASCE Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1975, 101(4):323~326.
- 5 张志新,王建东,李鑫,等. 虚拟节点有限元法解析滴灌支管水力学计算[J]. 农业机械学报,2009,40(3):99~102.
Zhang Zhixin, Wang Jiandong, Li Xin, et al. Finite element method for hydraulic design of drip irrigation submain units with virtual emitter system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):99~102. (in Chinese)
- 6 王新坤,蔡焕杰. 微灌坡地双向毛管最佳支管位置遗传算法优化设计[J]. 农业工程学报,2007,23(2):31~35.
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Optimal design for the best submain position of micro-irrigation on slope with paired laterals by genetic algorithms [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2):31~35. (in Chinese)
- 7 王新坤,蔡焕杰. 微灌毛管水力学解析及优化设计的遗传算法研究[J]. 农业机械学报,2005,36(8):54~58.
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Study on genetic algorithms of hydraulic analysis and optimum design for micro-irrigation laterals [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8):54~58. (in Chinese)
- 8 张国祥. 微灌毛管水力计算曲线图及其应用(均匀坡度) [J]. 喷灌技术,1991(2):17~22.
- 9 李蔼铿. 微机图解法的多口出流管道水力设计[J]. 喷灌技术,1990(4):8~11.
- 10 李蔼铿. 多口出流管道水力设计的微机诺谟图原理的研究[J]. 水利学报,1994(2):1~8.
Li Aikeng. Computerization of nomogram for hydraulic design of multi-outlet pipe [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(2):1~8. (in Chinese)
- 11 张国祥. 微灌毛管水力学设计的经验系数法[J]. 喷灌技术,1991(1):4~8.