

温室青椒水分生产函数及灌溉制度研究

李 波, 宋晓婷, 王铁良, 孙 健

(沈阳农业大学 水利学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要:以青椒品种“35-619”为试材,通过温室内桶栽滴灌试验,基于2年试验数据,采用Jensen模型,通过多元线性回归方法获得青椒不同生育阶段水分敏感指数,确定了青椒的水分生产函数;进而利用遗传算法以相对产量最大为目标,利用C#.net编制优化程序对青椒的滴灌灌溉制度进行了优化。结果表明:温室秋冬茬滴灌青椒生育期内的灌溉水量为190 mm,水分生产效率最高。

关键词:Jensen模型;青椒水分生产函数;遗传算法;优化灌溉制度

中图分类号:S 641.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2014)08-0034-04

在干旱、半干旱地区,农田灌溉对作物生长具有重要作用。但由于水资源量不足,可用于农田灌溉的水量也是有限的。在有限的灌溉水量下,如何通过水量在地区间、时间上的合理分配,以达到增加产量、提高灌溉水利用效率的目的,是非充分灌溉理论研究的重要内容^[1]。作物水分生产函数是描述作物产量与水分因子之间的数学关系,它不仅是对各种灌溉策略进行评价的重要依据,而且对非充分灌溉制度的确立及推广应用都具有重要用途^[2]。目前用于确定作物优化灌溉制度的方法很多,如动态规划方法、非线性规划方法、线性规划方法、模糊优化法、遗传算法优化法、混沌优化算法等,其中遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)作为一种新的全局优化搜索算法,具有稳定性强、适于并行处理

以及高效适用等显著特点,有效地解决了最优化问题的求解^[3-5]。

该研究在建立温室秋冬茬青椒水分生产函数的基础上,利用遗传算法优化作物的灌溉制度,以期为秋冬茬温室青椒的生产提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于沈阳农业大学水利学院综合试验基地日光温室中进行。试验地位于北纬41°46′,东经123°27′,海拔44.7 m。试验土质为棕壤土,平均土壤容重为1.52 g/cm³,田间持水率为39%(体积百分数)。土壤的理化性质见表1。

表 1

土壤理化性质

Table 1

Soil physical and chemical properties

| 全氮含量 Total N content /g·kg ⁻¹ | 全磷含量 Total P content /g·kg ⁻¹ | 全钾含量 Total K content /g·kg ⁻¹ | 碱解氮含量 Alkalihydrolyzable N content /g·kg ⁻¹ | 速效磷含量 Available P content /g·kg ⁻¹ | 速效钾含量 Available K content /g·kg ⁻¹ | 有机质含量 Organic matter content /g·kg ⁻¹ | pH值 |
|--|--|--|--|---|---|--|-----|
| 1.19 | 1.07 | 20 | 58.86 | 48.29 | 145.5 | 10.73 | 7.9 |

1.2 试验材料

供试材料为青椒品种“35-619”。

1.3 试验方法

1.3.1 试验小区布置 试验于2011年和2012年秋冬季进行,定植时间为每年的9月中旬。采用桶栽方式进行滴灌试验,重力滴灌方式,在桶上布置滴灌带并覆膜,

滴灌管直径16 mm,壁厚0.6 mm,滴头间距30 cm,流量2.4 L/h。桶高60 cm,桶径50 cm,装土高度50 cm。桶底为双层,层间隔10 cm,上层有7孔,达到通气渗水的作用。底层有1个孔外接滤水管可将渗水排出,进而可测出渗水量。桶内由下到上填装纱网-卵石-纱网-土壤,土壤层层压实。并安装TDR测管监测土壤含水量的变化,结合烘干法监测土壤含水量。试验布置见图1。

1.3.2 青椒水分胁迫设计 试验共设13个处理,每个处理3次重复。将青椒生长期划分为苗期、开花着果期、结果盛期、结果后期4个阶段。在试验实际实施过程中,难以准确控制灌水下限,故每个处理灌水控制下

第一作者简介:李波(1969-),女,博士,副教授,现主要从事生态环境及节水灌溉理论和技术等研究工作。E-mail: liboluck@126.com.

基金项目:辽宁省教育厅一般资助项目(L2012239)。

收稿日期:2013-12-18

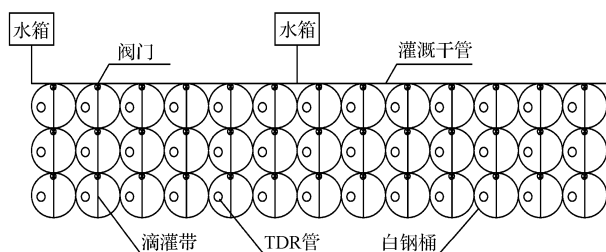


图1 试验布置

限均设有1个范围值。当土壤含水量降低至灌溉下限范围内时,补充水至处理上限,灌水上限土壤含水量是田间持水率。各处理的灌水量利用公式(1)计算。

$$m = (\theta_f - \theta) \times s \times h \times p \quad (1)$$

式中: m 为青椒的每次灌溉水量, m^3 ; θ_f 为田间持水量,即土壤含水量上限值; θ 为土壤体积含水量,即实测土壤含水量平均值; s 为试验小区面积, m^2 ; h 为青椒的计划湿润层深度, m ; p 为试验小区内土壤湿润比,取0.5。以灌水控制下限范围作为控制土壤水分的指标,各阶段的水分处理方案见表2。根据相关研究,青椒为浅根性蔬菜,根系群主要集中在30 cm土层内。故青椒各生育阶段的计划湿润层深度见表3。

表2 青椒水分胁迫试验设计

| 处理 | 苗期/% | 开花着果期/% | 结果盛期/% | 结果后期/% |
|----|-------|---------|--------|--------|
| CK | 85~90 | 85~90 | 85~90 | 85~90 |
| 1 | 45~50 | 75~80 | 80~85 | 75~80 |
| 2 | 55~60 | 75~80 | 80~85 | 75~80 |
| 3 | 65~70 | 75~80 | 80~85 | 75~80 |
| 4 | 70~75 | 45~50 | 80~85 | 75~80 |
| 5 | 70~75 | 55~60 | 80~85 | 75~80 |
| 6 | 70~75 | 65~70 | 80~85 | 75~80 |
| 7 | 70~75 | 75~80 | 45~50 | 75~80 |
| 8 | 70~75 | 75~80 | 55~60 | 75~80 |
| 9 | 70~75 | 75~80 | 65~70 | 75~80 |
| 10 | 70~75 | 75~80 | 80~85 | 45~50 |
| 11 | 70~75 | 75~80 | 80~85 | 55~60 |
| 12 | 70~75 | 75~80 | 80~85 | 65~70 |

注:土壤含水率下限以田间持水率的百分数计。

表3 青椒各生育期阶段的计划湿润层深度

| 生育阶段 | 苗期 | 开花着果期 | 结果盛期 | 结果后期 |
|------------|----|-------|------|------|
| 计划湿润层深度/cm | 20 | 40 | 40 | 40 |

1.4 项目测定

1.4.1 土壤水分测定 采用时域反射仪(TDR)测试土壤含水量,每3 d测量1次,灌水前后及2次灌水之间按时段连续监测土壤水分,监测深度为10、20、30 cm的土壤含水率。并定期利用烘干法监测土壤含水量,以掌握时域反射仪的监测精度。

1.4.2 产量测定 果实成熟后,采用精度为0.01 g的电子秤测量每个处理的产量并累计,得出总产量。

2 水分生产函数建立

2.1 模型的选取

综合分析前人的研究成果,并结合试验场的客观实际条件,选取目前国内外普遍公认和常用的乘法模型中的Jensen模型,即:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i} \quad (2)$$

式中: Y_a 为各处理条件下的实际产量, kg/hm^2 ; Y_m 为正常灌溉处理下的产量, kg/hm^2 ; ET_a 为各处理条件下第*i*阶段的实际耗水量, mm ; ET_m 为正常灌溉条件下第*i*阶段的耗水量, mm ; i 为阶段编号; λ_i 为各模型中青椒产量对缺水的反应系数或敏感系数。

2.2 参数求解

青椒水分生产函数的建立过程,先将Jensen模型线性化处理,然后再根据日光温室试验数据进行线性回归计算,可求解水分敏感指数。

对公式(1) $\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i}$ 两边取对数可得:

$$\ln \frac{Y_a}{Y_m} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \ln \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right) \quad (3)$$

令 $Z = \ln \frac{Y_a}{Y_m}$, $X_i = \left(\ln \frac{ET_a}{ET_m} \right)$, $K_i = \lambda_i$;

则式(3)可化成如下线性方程:

$$Z = \sum_{i=1}^n K_i X_i \quad (4)$$

作物生育阶段划分为*n*个阶段,*i*代表求解参数时划分的阶段序号, $i=1,2,\dots,n$ 。设非充分灌溉试验共有*m*个处理,处理号 $j=1,2,\dots,m$,在*m*个处理中设置1个充分灌溉处理,以便确定最大产量 Y_m 及其相应的阶段耗水量 ET_m ,其余*m*-1个处理为非充分灌溉处理。为得到唯一可行解,应满足 $m-1 > n+1$,为得到稳定最优解,应满足 $m \geq n$ 的约束条件,并尽可能使*m*较大。

采用最小二乘法原理,使估计值 \hat{Z}_j 与 Z_j 实测值之间的误差平方和最小,可求得满足下式的 K_i 值。

$$\min Q = \sum_{j=1}^m (Z_j - \hat{Z}_j)^2 = \sum_{i=1}^n (Z_j - \sum_{j=1}^m K_i \cdot X_{ij})^2 \quad (5)$$

$$\text{令 } \frac{\partial Q}{\partial K_i} = 0, \text{ 有 } \frac{\partial Q}{\partial K_i} = -2 \sum_{j=1}^m (Z_j - \sum_{i=1}^n K_i \cdot X_{ij}) \cdot X_{ij} = 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$L_{ik} = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot X_{kj}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$L_{iz} = \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot Z_j, i = 1, 2, \dots, n$$

化简方程组(2)~(5),可得一组联立线性方程

式,即

$$\begin{cases} L_{11}K_1 + L_{12}K_2 + \dots + L_{1n}K_n = L_{1Z} \\ L_{21}K_1 + L_{22}K_2 + \dots + L_{2n}K_n = L_{2Z} \\ \vdots \\ L_{n1}K_1 + L_{n2}K_2 + \dots + L_{nn}K_n = L_{nZ} \end{cases} \quad (8);$$

若用矩阵法求解,令

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_n \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} L_{1Z} \\ L_{2Z} \\ \vdots \\ L_{nZ} \end{bmatrix} \quad (9),$$

将式(9)改写为 $LK=F$, 所以 $K=L^{-1}F$, 解此方程, 可得回归系数 K_1, K_2, \dots, K_n 。求得 K_i 后, 即可求出 Jensen 模型中的 λ_i 的值。

试验共有 13 个处理, 青椒生育阶段划分为 4 个生育阶段, 由试验数据, 采用 SPSS 软件的非线性回归分析计算模型中的敏感指数, 得出研究条件下青椒的水分生产函数模型为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_1^{0.0987} \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_2^{0.3740} \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_3^{0.5126} \cdot \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)_4^{0.3079}。$$

3 灌溉制度优化模型及求解

3.1 确定数学模型

3.1.1 阶段变量 根据作物全生育期划分为各个不等长的生长阶段, 阶段变量为 $n=1, 2, 3, \dots, N$, 该试验中 $N=4$ 。

3.1.2 决策变量 该变量用来描述系统的特性, 该系统的决策变量为各个生长阶段实际灌水量 $m_i, i=1, 2, 3, \dots, N$ 。

3.1.3 状态变量 即为能够完全描述动态系统时域行为的所含变量个数最少的变量组称为系统的状态变量。该系统的状态变量为作物各个生长阶段初始土壤含水量 W_i 及初始可用于分配的总灌溉水量 q_i 。

3.1.4 数学模型 水量平衡方程: $W_{i+1} = W_i - ET_i + d_i + P_i + K_i - D_i$; $W_i = 667 \times H \times (\theta_i - \theta_{up})$; $W_{i+1} = 667 \times H \times (\theta_{i+1} - \theta_{up})$, 式中: W_i 为第 i 阶段初土壤含水量, $m^3/667m^2$; W_{i+1} 为第 i 阶段末、第 $i+1$ 阶段初的土壤含水量, $m^3/667m^2$; ET_i 为第 i 生育阶段蒸发蒸腾量, $m^3/667m^2$; d_i 为第 i 生育阶段灌水量, $m^3/667m^2$; P_i 为第 i 生育阶段降水量, $m^3/667m^2$, 温室内无降雨, 此项为 0; K_i 为第 i 生育阶段地下水埋深, 试验作物在大桶内种植, 此项为零, $m^3/667m^2$; D_i 为第 i 生育阶段渗漏量, $m^3/667m^2$; H 为计划湿润层, m。水量分配方程: $q_{i+1} = q_i - d_i$, 式中: q_i 和 q_{i+1} 分别为第 i 生育阶段和第 $i+1$ 生育阶段可分配的水量, $kg/667m^2$ 。

3.1.5 目标函数 $F = \text{Max} \left(\frac{Y_a}{Y_m} \right) = \text{Max} \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET_a}{ET_m} \right)^{\lambda_i}$,

式中: Y_a 为各处理条件下的实际产量, $kg/667m^2$; Y_m 为正常灌溉处理下的产量, $kg/667m^2$; ET_a 为各处理条件下第 i 阶段的实际蒸发蒸腾量, $m^3/667m^2$; ET_m 为正常灌溉条件下第 i 阶段的蒸发蒸腾量, $m^3/667m^2$; i 为阶段编号; λ_i 为青椒产量对缺水的反应系数或敏感指数。

3.1.6 约束条件 ①决策约束: $0 \leq d_i \leq q_i (i=1, 2, \dots, N)$, $\sum_{i=1}^N d_i = M (i=1, 2, \dots, N)$, $0 \leq q_i \leq M (i=1, 2, \dots, N)$,

式中: d_i 为第 i 生育阶段的灌水量, $kg/667m^2$; q_i 为第 i 生育阶段可分配的水量, $kg/667m^2$; M 为全生育期可供分配的水量, 即灌溉定额, $kg/667m^2$ 。②土壤含水量约束: $\theta_{up} \leq \theta_i \leq \theta_f$, 式中: θ_{up} 为凋萎含水率, %; θ_i 为土壤含水量, %; θ_f 为田间持水率, %。

3.2 基于遗传算法优化青椒灌溉制度的程序框图

利用遗传算法, 采用 C#.net 编制青椒灌溉制度优化程序, 程序框图见图 2。

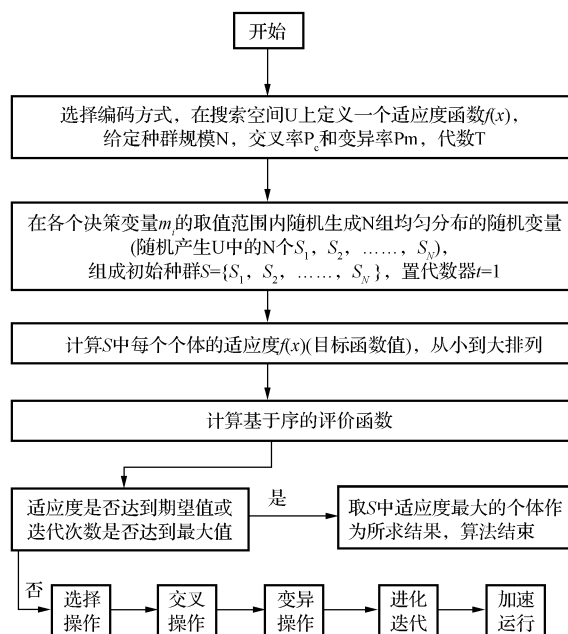


图2 程序框图

3.3 求解结果及分析

3.3.1 优化程序的基本参数 灌溉制度优化程序的基本参数及数值见表 4。

表 4 青椒优化灌溉制度基本参数

| 编号 | 生育阶段 | 起止日期 /月-日 | 天数 /d | 计划湿润层深度 /m | 敏感指数 λ | 667 m ² 临界土壤含水量 /m ³ | 667 m ² 蒸发蒸腾量 ET _m /m ³ |
|----|-------|--------------|----------|---------------|-------------------|---|---|
| 1 | 苗期 | 9-13~10-16 | 34 | 0.2 | 0.0987 | 20.6534 | 27.2787 |
| 2 | 开花结果期 | 10-17~11-19 | 33 | 0.4 | 0.3740 | 37.8856 | 49.4478 |
| 3 | 结果盛期 | 11-20~1-2 | 43 | 0.4 | 0.5126 | 40.5536 | 79.4064 |
| 4 | 结果后期 | 1-3~2-11 | 40 | 0.4 | 0.3079 | 36.5516 | 62.7113 |

3.3.2 优化结果 利用编制的灌溉制度优化程序,基于试验数据得到温室青椒灌溉制度优化结果见表5。其中相对产量是指各处理产量与处理中最大产量的比值。

表5 温室青椒灌溉制度优化

| 667 m ² 可供水量/m ³ | 苗期 | 开花着果期 | 结果盛期 | 结果后期 | 相对产量 |
|--|----|-------|------|------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.0050 |
| 10 | 0 | 4 | 5 | 1 | 0.0162 |
| 20 | 1 | 4 | 9 | 6 | 0.0395 |
| 30 | 8 | 7 | 10 | 5 | 0.0543 |
| 40 | 9 | 19 | 7 | 5 | 0.0660 |
| 50 | 5 | 16 | 23 | 6 | 0.1378 |
| 60 | 4 | 14 | 32 | 10 | 0.1909 |
| 70 | 8 | 18 | 32 | 12 | 0.2167 |
| 80 | 7 | 15 | 17 | 41 | 0.2249 |
| 90 | 11 | 23 | 36 | 20 | 0.3361 |
| 100 | 2 | 18 | 51 | 29 | 0.3896 |
| 110 | 13 | 18 | 50 | 29 | 0.3960 |
| 120 | 18 | 58 | 31 | 13 | 0.3518 |
| 130 | 8 | 14 | 64 | 44 | 0.4647 |
| 140 | 27 | 40 | 41 | 32 | 0.5211 |
| 150 | 33 | 35 | 50 | 32 | 0.6024 |
| 160 | 13 | 47 | 60 | 40 | 0.6816 |
| 170 | 8 | 29 | 89 | 44 | 0.7094 |
| 180 | 14 | 48 | 78 | 40 | 0.8809 |
| 190 | 18 | 52 | 73 | 47 | 0.9274 |
| 200 | 24 | 59 | 79 | 38 | 0.9512 |
| 210 | 23 | 61 | 83 | 43 | 0.9566 |
| 220 | 10 | 62 | 93 | 55 | 0.9684 |
| 230 | 16 | 72 | 86 | 56 | 0.9892 |

3.3.3 优化结果分析 由表5优化结果得出,在青椒生育期内,当灌溉供水量由0增加到190 mm时,作物相对产量提高幅度比较明显,从0.0050增加到0.9274,分别提高0.9224,即每增加10 mm灌溉水量,相对产量平均增加幅度为0.1025。当生育期灌水量由190 mm增加到230 mm时,相对产量逐渐提高,但增加幅度明显减小,平均增加幅度为0.0155,而且随着灌溉水量的继续增加,作物水分生产率将会变低。由此可得,日光温室青椒生育期内作物灌溉水量以190 mm为最佳;在灌溉水量一定的情况下,需要优先保证作物水分敏感指数比较大的生育阶段对水分的需求。

Study on Water Production Function and Irrigation System of Green Pepper in Solar Greenhouse

LI Bo, SONG Xiao-ting, WANG Tie-liang, SUN Jian

(Water Conservancy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang, Liaoning 110866)

Abstract: Taking green pepper variety of '35-619' as material, by drip irrigation experiment of Barrel-planted peppers in a greenhouse in both autumn and winter, the water sensitivity index and water production function of green pepper at different stages was obtained through multiple linear regression method based on 2-year test datum, adopting Jensen Model. Furtherly, compiling optimization program by C#.net language, drip irrigation regime of green pepper was optimized by using the genetic algorithm with the goal of maximizing the relative production. The results showed that drip irrigation water of green pepper dripping its whole growth period in a greenhouse in both autumn and winter was 190 mm with the highest water production efficiency.

Key words: Jensen model; water production function of green pepper; genetic algorithm; optimization of irrigation regime

4 结论

滴灌条件下日光温室秋冬茬青椒4个生育期的敏感指数分别为0.0987、0.3740、0.5126、0.3079;需水关键时期为结果盛期,日耗水强度为2.77 mm/d,保证这一阶段灌溉水量充足,对作物增产作用很大。

在日光温室青椒水分生产函数的基础上,利用遗传算法以相对产量最大为目标对青椒的灌溉制度进行了优化。可知青椒产量随灌溉定额的增加而增加,但随着灌溉定额的加大,产量增加的幅度逐渐变小,到达一定灌溉定额时,再增加供水将会对产量增加产生负面的影响、降低水分利用效率。滴灌条件下秋冬茬温室青椒生育期内适宜的灌水量为190 mm。

滴灌条件下日光温室青椒水分生产函数及其优化灌溉制度的建立,确定了青椒各阶段的优化灌水量,可把有限的水资源灌溉到青椒产量对缺水最敏感的时期,节约灌溉用水量,提高水分生产率,对于秋冬季节日光温室滴灌条件下青椒的生产水分管理具有一定的指导作用。

参考文献

- [1] 尚松浩. 作物非充分灌溉制度的模拟-优化方法[J]. 清华大学学报, 2005, 45(9): 1179-1183.
- [2] 王克全, 付强, 季飞, 等. 黑龙江省西部半干旱区水稻水分生产函数及优化灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2007(8): 48-51.
- [3] 王立坤. 三江平原井灌水稻灌溉制度建模及其优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2002.
- [4] 何春燕, 张忠, 何新林, 等. 作物水分生产函数及灌溉制度优化的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(3): 42-45.
- [5] 张宾, 袁寿其, 李红, 等. 基于最优保留策略遗传算法的玉米小麦优化灌溉模型研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 25-29.
- [6] 罗安荣. 温室樱桃番茄产量品质及水分生产函数[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [7] 朱敏, 史海滨, 赵玮. 基于遗传算法的小麦套玉米节水型优化灌溉制度研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(3): 18-22.