

春小麦水分敏感指数与有限水量生育期的最优分配

杜尧东¹, 宋丽莉², 邵洋³

(1 广州热带海洋气象研究所, 广东 广州510080; 2 广东省气候与农业气象中心, 广东 广州510080;

3 广东省气象局技术装备中心, 广东 广州510080)

摘要: 通过不同的受旱处理, 确定了 Jensen 模型中的春小麦水分敏感指数. 介绍了运用动态规划模型实现有限水量生育期最优分配的方法与步骤, 并以辽西地区春小麦为例, 确定了不同生育期可利用灌溉水量下的最优分配决策.

关键词: 春小麦; 水分敏感指数; Jensen 模型; 动态规划

中图分类号: S512.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2003)04-0001-04

植物生理学者很早就提出了作物水分敏感期的概念, 并建议水量有限条件下应优先保证作物水分敏感期用水^[1]. 但这只是一种定性的概念与提法, 不能确定耗水量与产量之间的定量关系. 随着水资源紧缺程度的加剧和水商品属性的日渐提高, 人们已不满足这些定性认识, 而要求实现有限水量的作物全生长过程中的最优分配. 20世纪60年代以来, 国外对作物-水分关系进行了大量的试验研究, 提出了许多作物水分生产函数模型, 其中以 Jensen 为代表的乘法模型得到了广泛应用^[2~4]. 作物水分生产函数的确立为实现水量有限条件下的最优分配提供了依据. 由于有限水量的最优分配可以看成是一个多阶段决策过程, 因此可以用运筹学和系统分析方法来完成这种最优决策^[5~7]. 春小麦主要生长在3~6月雨量稀少的季节, 因此生育期灌溉成为春小麦高产稳产的主要措施. 辽西地区水资源比较缺乏, 人均水资源占有量仅为全国平均水平的24%. 为此, 本文根据1998年在辽宁省喀左县进行的春小麦受旱试验资料, 在确定 Jensen 模型中春小麦水分敏感指数的基础上, 利用动态规划方法, 对春小麦进行了有限水量条件下生育期的最优分配, 试图找到一种适合于我国丘陵半干旱地区的春小麦灌溉模式.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于1998年在辽宁省西部的喀左县农业示范

场固定式防雨棚内进行. 试验地位于41°05'N, 119°43'E, 属典型的丘陵半干旱区. 年平均降水量481mm, 年平均气温8.3℃, 土壤为褐土, 质地为中-重壤土. 棚内设有5m×10m的标准规格水分池18个, 四周由厚24.5cm、深1.5m的水泥墙隔离, 防止水分的侧向移动. 用苫布作遮雨篷, 人工操作, 雨前及时遮盖防雨, 雨后立即拉开透光. 水分池四周设有地下管道的出水口, 灌溉时利用软管进行人工喷洒, 出水口处安置水表计量灌溉水量.

把春小麦生长阶段划分为播种至分蘖、分蘖至拔节、拔节至抽穗、抽穗至乳熟和乳熟至收获等5个阶段. 受旱处理为单阶段受旱, 受旱水平以占田间持水量的55%~60%来控制, 另设任何阶段均不缺水的处理为对照, 共6个处理(表1), 每个处理3次重复, 随机排列. 供试品种为“辽春10号”, 3月20日播种, 7月15日收获. 除水分处理外, 其余管理措施各小区相同. 土钻法测定土壤湿度. 每10cm取样1次至150cm深, 重复3次取平均值, 取样间隔为10d, 作物主要发育期加测. 不同阶段的实际耗水量由水量平衡方程^[8]求出. 实测各小区产量.

1.2 数学模型及求解方法

采用 Jensen 模型确定春小麦水分敏感指数, 其中, 正规方程组采用最小二乘法求解. 根据动态规划方法进行有限水量生育期的最优分配决策, 利用逐次渐近法(DSPA)对动态规划模型进行求解.

表1 春小麦受旱试验处理¹⁾

Tab. 1 Water deficit treatments for spring wheat

处 理 treatments	水分状况 water condition				
	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4	阶段 5
	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5
I (CK)	+	+	+	+	+
II	-	+	+	+	+
III	+	-	+	+	+
IV	+	+	-	+	+
V	+	+	+	-	+
VI	+	+	+	+	-

1)“+”表示该阶段正常灌溉,“-”表示该阶段受旱

2 结果与分析

2.1 春小麦水分敏感指数

采用 Jensen 乘法模型来确立春小麦水分敏感指数. Jensen 模型是美国科学家 Jensen 根据阶段缺水试验造成减产的研究成果建立起来的,该模型的理论假设在于不同阶段的水分亏缺对产量的影响不是孤立的,某个阶段缺水不仅对本阶段产生影响,而且经过连乘后又影响总产.因此 Jensen 乘法模型在物理意义上和对总产量反应的灵敏度上均优于加法模型^{8,9}. Jensen 乘法模型为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \prod_{i=1}^N \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right)^{\lambda_i}, \quad (1)$$

式中, Y_a —各处理条件下的实际产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_m —充分供水条件下最高产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_{ai} —各处理条件下第 i 阶段实际耗水量,采用农田水量平衡方程求得¹⁰⁾ (mm); ET_{mi} —充分供水条件下第 i 阶段的需水量 (mm); λ_i —水分敏感指数,反映第 i 阶段供水不足对产量的影响; i —作物阶段编号; N —作物全生长期的阶段数.

研究表明,模型中 Y_m 选择试验条件下的实际最高产量, ET_{mi} 采用各阶段均不缺水处理的蒸散量为好¹¹⁾.

对(1)式两边取对数

$$\ln \left(\frac{Y_a}{Y_m} \right) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \ln \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right), \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

令 $\ln \left(\frac{Y_a}{Y_m} \right) = Z$, $\ln \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}} \right) = X_i$, 则有:

$$Z = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot X_i, \quad (3)$$

根据表2的实测产量和实际蒸散量资料,采用最小二乘法,求得春小麦不同阶段的 λ_i 分别为:播种至分蘖 0.034 6,分蘖至拔节 0.228 1,拔节至抽穗 0.411 3,抽穗至乳熟 0.542 3,乳熟至收获 0.283 5.

表2 春小麦各生育阶段实际蒸散量和产量

Tab. 2 Actual evapotranspiration and yield at different stages for spring wheat

处理 treatments	实际蒸散量 actual evapotranspiration / mm						产量 yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
	阶段 1 stage 1	阶段 2 stage 2	阶段 3 stage 3	阶段 4 stage 4	阶段 5 stage 5	总计 total	
I (CK)	60.5	108.5	126.0	112.9	147.2	555.1	7 656.1
II	15.0	90.1	114.3	96.9	112.8	429.1	7 017.3
III	56.4	42.0	120.1	105.3	120.1	443.9	6 186.1
IV	53.4	102.3	40.5	106.8	134.1	437.1	5 619.6
V	59.5	105.1	117.6	45.0	112.2	439.4	4 975.5
VI	57.1	97.2	104.6	103.7	63.0	425.6	6 402.4

2.2 有限水量生育期的最优分配

2.2.1 数学模型 (1) 变量设置:

①阶段变量 以划分的春小麦生长阶段为阶段变量, $i = 1, 2, \dots, N$; 其编号与阶段初编号一致.

②状态变量 状态变量为各阶段初可用于分配的灌溉水量 M_i 及计划湿润层可供作物利用的土壤含水量 S_i . S_i 可通过下式求出:

$$S_i = 10 \rho H_i (\theta_i - \theta_w), \quad (4)$$

式中, S_i —计划湿润层可供作物利用的土壤含水量 (mm); ρ —土壤干容重 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$); H_i —计划湿润层深度 (m); θ_i —计划湿润层平均土壤含水量 (占干土质

量的 %); θ_w —土壤含水量下限 (占干土质量的 %).

(2)系统方程:系统方程是描述系统在运动过程中状态转移的方程.由于本系统有 2 个状态变量,系统方程也有 2 个.

①水量分配方程

若对第 i 个生长阶段采用决策 I_i 时,则

$$M_{i+1} = M_i - I_i, \quad (5)$$

式中, M_i 、 M_{i+1} 分别为第 i 和第 $i+1$ 阶段初系统可用于分配的水量 (mm); I_i —第 i 阶段的灌水量 (mm).

②土壤计划湿润层水量平衡方程

$$S_{i+1} = S_i + I_i + P_i + G_i - ET_i - D_i \quad (6)$$

式中, S_i 、 S_{i+1} 分别为第 i 、第 $i+1$ 阶段初土壤计划层中可供利用的水量(mm); P_i —第 i 阶段有效降雨量(mm); G_i —第 i 阶段地下水补给量(mm); ET_i —第 i 阶段的实际蒸散量(mm); D_i —第 i 阶段的渗漏量(mm)。

(3)目标函数:采用 Jensen 提出的产量水分生产函数相乘模型,目标函数为单位面积的实际产量 Y_a 与最高产量 Y_m 的比值最大,即

$$F = \max\left(\frac{Y_a}{Y_m}\right) = \max \prod_{i=1}^N \left(\frac{ET_{ai}}{ET_{mi}}\right)^{\lambda_i} \quad (7)$$

(4)约束条件:①第 i 阶段土壤耗水量约束

$$S_{mini} \leq ET_i \leq ET_{mi} \quad (8)$$

式中, S_{mini} —第 i 阶段维持作物正常生长的最低土壤含水量(mm); ET_{mi} —第 i 阶段理论最大蒸散量(mm),由彭曼修订式求出^[12]。

②第 i 阶段土壤含水量约束

$$S_{mini} \leq \theta_i \leq S_{maxi} \quad (9)$$

式中, S_{maxi} —土壤湿润层最高田间持水量(mm)。

③第 i 阶段灌水量约束

$$0 \leq I_i \leq M_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N I_i \leq M, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中, M —作物全生育期单位面积上可供灌溉的水量(mm)。

(5)初始条件:①假定作物播种时的土壤含水量为已知,即 $\theta_1 = \theta_0$,则有

$$S_1 = 10\rho H_1(\theta_0 - \theta_w) \quad (12)$$

②假设第一阶段初可用于分配的水量为农作物全生长期可用于分配的水量,即

$$M_1 = M. \quad (13)$$

2.2.2 模型的求解方法 本模型是一个具有2个状

态变量及2个决策变量的二维动态规划问题,可用动态规划逐次渐近法(DSPA)求解.步骤如下:

(1)把作物各生育阶段初土壤中可供利用的水量 S_i 作为已知的虚拟轨迹,以每阶段初可供分配的水量 M_i 作为第1个状态变量,将其离散成 N_1 个水平.这样二维问题将为一维问题,采用常规动态规划的逆序递推顺序决策的方法进行计算.经优化计算,得出给定条件下的最优状态序列 $\{M_i^*\}$ 及最优决策序列 $\{I_i^*\}$, $i=1, 2, \dots, N$.

(2)将第1步的优化结果 $\{M_i^*\}$ 和 $\{I_i^*\}$ 固定,在给定的初始条件下,求解土壤 S_i 可利用水量和各生育阶段实际蒸散量的最优值,将第2个 S_i 状态变量离散成 N_2 个水平,用常规的动态规划求解.经最优计算,得出给定条件下的最优状态序列 $\{S_i^*\}$ 及最优决策序列 $\{ET_i^*\}$, $i=1, 2, \dots, N$.

(3)比较前2步的计算结果.如果第2步的优化结果 $\{S_i^*\}$ 与第1步的 $\{S_i\}$ 不同,则以 $\{S_i^*\}$ 为虚拟轨迹,重复上述步骤,直到得出满足要求的解.

2.2.3 最优分配结果 根据上述试验资料、有效降雨资料及其他有关资料,可以计算出3种代表年($P=50\%$, 75% , 90%)在各种可用灌溉水量条件下,春小麦各生长阶段的最优分配决策.按播种前土壤初始含水量 16% (可供水量 40 mm),以及 $P=75\%$ 代表年春小麦各阶段的已知数据(表3)计算的 $P=75\%$ 条件下的最优分配结果见表4.

3 结论与讨论

(1)Jensen 模型中,春小麦不同阶段的水分敏感指数分别为:播种至分蘖 0.0346 , 分蘖至拔节 0.2281 , 拔节至抽穗 0.4113 , 抽穗至乳熟 0.5423 , 乳熟至收获 0.2835 .

表3 春小麦各生育阶段有关数据

Tab. 3 Relevant data at different stages for spring wheat

项目 item	阶段 1 stage 1	阶段 2 stage 2	阶段 3 stage 3	阶段 4 stage 4	阶段 5 stage 5
有效雨量 effective rainfall (P_i)/mm	21.1	14.5	31.2	64.3	43.2
最高田间持水量 maximum field capacity (S_{max})/mm	101	101	131	161	161
最低土壤含水量 minimum soil water content (S_{min})/mm	55.3	55.3	71.2	86.0	86.0
最大蒸散量 maximum evapotranspiration (ET_m)/mm	63	113	120	120	168
水分敏感指数 water sensitivity index (λ_i)	0.0346	0.2281	0.4113	0.5423	0.2835

表4 各种可利用灌溉水量下的最优分配决策¹⁾

Tab. 4 Optimum distribution decisions under conditions of different available irrigation water

灌溉定额 irrigation quota/mm	最优决策 optimum decisions					产量比 yield ratio (Y_a/Y_m)	可获得产量 available yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)
	阶段1 stage 1	阶段2 stage 2	阶段3 stage 3	阶段4 stage 4	阶段5 stage 5		
90	0	0	0	2	1	0.334	2 271.2
120	0	0	1	2	1	0.461	3 134.8
150	0	0	1	3	1	0.562	3 821.6
180	0	0	2	3	1	0.694	4 719.2
210	0	0	2	3	2	0.801	5 446.8
240	0	1	2	3	2	0.866	5 888.8
270	0	1	2	3	2	0.968	6 582.4
300	0	1	2	3	2	0.987	6 711.6

1) 取每次灌水定额 30 mm

(2) 利用动态规划实现有限水量作物生育期的最优分配是可行的。但有限水量的最优分配与生育期降水量关系极大, 本文的结果 $P=75\%$ 情况下的最优决策, 所用水分敏感指数也只是 1 年的数据, 目的在于说明模型的实用性, 在具体应用时, 应根据多年试验求算水分敏感指数, 并针对某一年的降水观测或预报值, 运用本模型进行有限水量的最优分配。

参考文献:

- [1] 姜成后. 作物栽培的生理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1981. 87-96.
- [2] 茆智, 崔远来, 李建新. 我国南方水稻水分生产函数试验研究[J]. 水利学报, 1994 (9): 21-23.
- [3] 王仰仁. 几种作物的水分敏感指数[J]. 山西水利科技, 1991, (3): 34-36.
- [4] 郭群善. 冬小麦水分生产函数 Jensen 模型敏感指数的研究[J]. 水科学进展, 1996 7(1): 20-25.

- [5] 江平. 系统分析方法在国外农水事业中的应用[J]. 灌溉排水, 1988 7(3): 43-52.
- [6] 吴凯. 节水农业研究中的几种系统分析方法[A]. 许越先. 节水农业研究[C]. 北京: 科学出版社, 1992. 38-45.
- [7] 崔远来, 李远华, 茆智. 作物缺水条件下灌溉供水量的最优分配[J]. 水利学报, 1997, (2): 67-71.
- [8] HILLEL D. Crop water production functions[J] Advance in Irrigation, 1983 2: 61-69.
- [9] 陈亚新. 作物-水分模型及其敏感指标的确认[J]. 灌溉排水, 1995 14(4): 1-6.
- [10] 陈志雄. 农田水量平衡[J]. 土壤学进展, 1985 (1): 26-30.
- [11] 李远华. 节水灌溉理论与技术[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999. 69-94.
- [12] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995. 1-51.

Water Sensitivity Indexes for Spring Wheat and Optimum Distribution of Limited Water During its Development Stage

DU Yao-dong¹, SONG Li-li², SHAO Yang³

(1 Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangzhou 510080, China;

2 Climatic and Agrometeorological Center of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China;

3 Technology Equipment Center, Meteorological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510080, China)

Abstract: Based on different water deficit treatments, water sensitivity indexes for spring wheat were established. The means and steps of accomplishing optimum distribution of limited water during crop development stage using dynamic programming were introduced. Then taking spring wheat in western Liaoning province for example, the optimum distribution decision of dynamic programming model was made under the conditions of available irrigation water during different development stage.

Key words: spring wheat; water sensitivity index; Jensen model; dynamic programming

【责任编辑 周志红】