

文章编号: 1000-0887(2003) 06-0644-09

多种环境外力作用下作物生长系统的动力学模型及过程数值模拟*

李自珍¹, 王万雄², 徐彩琳²

(1. 兰州大学 数学系, 兰州 730070;

2. 兰州大学 干旱农业生态国家重点实验室, 兰州 730070)

(王银邦推荐)

摘要: 依据生物力学的理论与方法, 综合探讨了多种环境因子(光照、温度、土壤水分与养分等)外力作用下作物生长的动力学机制。采用连续马尔柯夫过程方法建立了作物生长系统的动力学模型及数值模拟方法, 研究了生长速率对外力条件变化的反应与生物量饱和值的变化, 并以半干旱区作物为例进行了数值模拟计算与分析, 为大田管理提供了定量依据。该动力模型与其它植物生长模型相比, 其优越性在于从宏观和微观相结合上反映了资源利用的多维性, 揭示了资源转化过程。所建作物生长系统模拟方法, 具有先进性和可操作性, 实际模拟结果与大田观测结果能很好吻合。

关键词: 环境外力; 作物生长; 动力学模型; 数值模拟

中图分类号: Q141 **文献标识码:** A

引 言

从生物力学上讲, 农田作物生长系统是转化环境资源因子(光照、温度、土壤水分和养分、CO₂等)为农田初级生产力的人工生态系统。该系统受到的环境广义的外力变量包括光照强度、温度维持作用、土壤水分和养分的有效利用率等, 系统内生物变量包括作物的叶面积指数、根体积、生物量和籽粒产量等, 另外还需要考虑作物活生物量的呼吸消耗和暗呼吸作用, 它们是系统的内作用力。关于作物的生长过程, 从光能的输入, 然后在温度、土壤水分和养分参与下经过光合作用(碳同化作用)形成有机物并在植物体内输送、存贮等, 一直到生物量的输出, 经历了复杂的动力学过程。在该动力学过程中, 共受到 4 种环境外力和 2 种系统内力的作用, 一般情况下, 各环境外力输入对系统具有正反馈作用, 即在一定范围内环境外力的增加可导致系统输出的增加, 而内力作用则形成系统的负反馈机理。定量研究作物生长动力学过程中的反馈机理在理论和生产实践中都是有价值的。以下本文通过对作物生长过程的复杂动力学过程的分析, 采用连续马尔柯夫过程方法, 建立多种环境外力作用下的作物生长系统的动力学模

* 收稿日期: 2001_03_06; 修订日期: 2003_02_25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G2000018603, 2002CAC00300); 国家自然科学基金资助项目(39970135, 30070139)

作者简介: 李自珍(1949—), 男, 河南许昌人, 教授, 博士, 博士生导师(E-mail: zizhenlee@lzu.edu.cn); 王万雄(1964—), 男, 甘肃会宁人, 副教授(E-mail: wxiong@west163.com)。

型及数值模拟方法, 并通过实例的计算与分析, 为指导西部半干旱区农业生产实践提供科学依据。

1 作物生长动力学过程的数学模型

1.1 连续马尔柯夫过程建模方法与模型

关于植物生长模型, 在生物学中已有较多的研究工作, 从简单的单变量方程到包含植物生物量形成过程的复杂动力学模型都有。这些模型, 往往只重视个别环境因子的作用和植物对资源的竞争, 较少考虑到环境因子的多维性。如著名的 Logistic 方程将环境因子的影响仅表示为一个抽象的环境容纳量, Gates^[1] 的生长方程强调植物个体在空间上的相互作用; McMartrie 和 Wolf 等人^[2] 主要考虑了光的利用; Walker 等人^[3] 主要研究了植物对水分的利用; 张银萍等人(2000)^[4] 以及郭瑞海等人(2000)^[5] 用确定性方法研究了动力学机制。Olson(1985)^[6] 和 Sharpe 等人(1985)^[7] 提出的生态学中的连续马尔柯夫方法(CTM), 则考虑了光照、水分和养分等 3 种环境因子的作用, 而忽略了温度因子的作用。事实上, 温度因子也是不可忽视的制约生长的主要外力因子, 它在一定程度上制约着植物光合作用的进行。另外, 在半干旱地区, 土壤水分与养分之间存在着补偿作用, 通过适当施肥, 增加土壤养分可以提高土壤水分利用率, 一定限度内补偿土壤水分之不足。下面我们根据 CTM 建模方法, 增加温度因子和水肥补偿作用力, 建立作为生长系统新的动力学模型。

1.2 系统状态设置与转移概率

在采用 CTM 建立作物生长的动力学模型时, 作物生长被定义为包括其产生活生物量 (W) 的一切代谢组分, 即认为生长是生物量的净增长, 包含一切生物量的形成、积累与维持呼吸、分解代谢等。系统的状态是由其所受的作用力决定的。作物生长系统受到了光照强度(I)、温度支持作用(T)、土壤水分(H) 和养分(N) 等 4 种环境外力, 和呼吸消耗、暗呼吸作用等 2 种内力的作用, 因此该系统共设置 6 种状态。当在 Δt 时间内系统从 i 状态转移到 j 状态时, 其平均转移概率用 λ_{ij} 表示。需要说明的是这里 Δt 时间内的平均转移概率 λ_{ij} , 不同于离散时间的马尔柯夫过程中的一步转移概率 P_{ij} , 前者发生于 Δt 内, 后者发生于 Δt 的时间末端。

系统所受 4 种环境外力的综合作用, 可以认为是它们逐次作用迭加的结果, 即先受光热强度的作用, 然后依次受温度支持作用、土壤水分有效率及养分有效率的作用, 它们构成正反馈的生长循环。呼吸需要和暗呼吸作用另外构成一个负反馈的呼吸循环。作物生物量则与其生长存贮、呼吸需要有关。由此可得作物生长系统动力学过程的状态转移图(见图 1)。

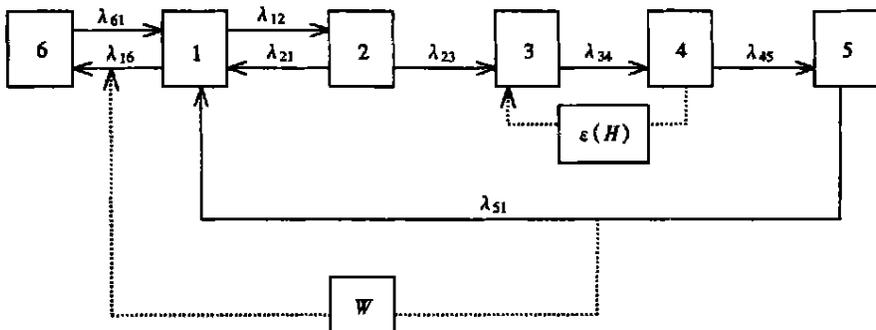


图 1 作物生长系统动力学过程的状态转移图

图 1 中的各平均转移概率 λ_{ij} 分别表示受以下因素作用: λ_{12} — 光照强度; λ_{21} — 光反应, λ_{23} — 温度支持作用; λ_{34} — 土壤水分利用率, λ_{45} — 土壤养分利用率, λ_{51} — 生物量生长与存贮; λ_{16} — 呼吸需要, λ_{61} — 暗呼吸。另外, W — 生物量库, $\varepsilon(H)$ — 养分对水分的补偿。

1.3 作物生长过程

依据 CTM 方法建立作物生长方程, 依据如下假设:

- 1) 无记忆假设, 即系统 t 时刻的状态仅依赖于 $(t-1)$ 时刻的状态;
- 2) 系统在 Δt 时间内从状态 i 到 j 的转移概率与 Δt 成正比;
- 3) 平均转移概率 λ_{ij} 不随时间 t 变化, 即 λ_{ij} 保持相对稳定值;
- 4) Δt 应足够小, 使发生状态转移次数保持在 0 或 1。

在以上假设下, 由状态转移图(图 1) 可得如下状态转移矩阵 (A):

表 1 基于图 1 的状态转移矩阵

状态	1	2	3	4	5	6
1	$-(\lambda_{12} + \lambda_{16})$	λ_{12}	0	0	0	0
2	λ_{21}	$-(\lambda_{21} + \lambda_{23})$	λ_{23}	0	0	0
3	0	0	$-\lambda_{34}$	λ_{34}	0	0
4	0	0	0	$-\lambda_{45}$	λ_{45}	0
5	0	0	0	0	$-\lambda_{51}$	0
6	λ_{61}	0	0	0	0	λ_{16}

若记 $\pi_i (i = 1, 2, \dots, 6)$ 为状态 i 的占据概率, 将 A 归一化, 即记 $\pi = [\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_6]$ 。并令

$$\pi A = \mathbf{0} \quad (1)$$

标准化方程为

$$\sum_{i=1}^6 \pi_i = 1 \quad (2)$$

$$\begin{cases} \pi_1 = (\lambda_{21} + \lambda_{23}) \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} / D, \\ \pi_2 = \lambda_{12} \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} / D, \\ \pi_3 = \lambda_{12} \lambda_{23} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} / D, \\ \pi_4 = \lambda_{12} \lambda_{23} \lambda_{34} \lambda_{51} \lambda_{61} / D, \\ \pi_5 = \lambda_{12} \lambda_{23} \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{61} / D, \\ \pi_6 = (\lambda_{12} + \lambda_{23}) \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} / D. \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式即为各状态的占据概率, 其中

$$D = \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} [(\lambda_{21} + \lambda_{23})(\lambda_{61} + \lambda_{16}) + \lambda_{12} \lambda_{61}] + \lambda_{12} \lambda_{23} \lambda_{61} (\lambda_{45} \lambda_{51} + \lambda_{34} \lambda_{51} + \lambda_{34} \lambda_{45}) \quad (4)$$

作物生长过程中以生物量 W 为作物增长的描述变量, 生物量以单位面积上的作物干重来计量。单位生物量的增长速率称为相对生长速率(RGR), 它应是生长量与呼吸消耗的差值, 即是:

$$\text{RGR: } \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \lambda_{51} \pi_5 - \lambda_{16} \pi_1 = \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} [\lambda_{12} \lambda_{23} - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) \lambda_{16}] / D \quad (5)$$

由此得绝对生长速率(即生长方程)为:

$$\text{GR: } \frac{dW}{dt} = \lambda_{34} \lambda_{45} \lambda_{51} \lambda_{61} [\lambda_{12} \lambda_{23} - (\lambda_{21} + \lambda_{23}) \lambda_{16}] W / D \cdot \quad (6)$$

另外,作物生长需要参考其呼吸作用,跃迁速率 λ_{16} 则反映呼吸消耗,而作物的呼吸消耗与活的生物量成正比,因此可设:

$$\lambda_{16} = \alpha_6 W \cdot \quad (7)$$

(7) 式中 α_6 为 λ_{16} 的速率系数, W 为生物量. 将(7)式和(4)式的值分别代入(5)式、(6)式,经化简整理得作物相对生长速率为:

$$\frac{1}{W} \frac{dW}{dt} = \frac{1 - F_1 W}{F_2 + F_3 W} \cdot \quad (8)$$

作物生长方程为:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{(1 - F_1 W) W}{F_2 + F_3 W} \cdot \quad (9)$$

其中 F_1, F_2, F_3 为引入的 3 个集合参数,分别是:

$$F_1 = \frac{\alpha_6 (\lambda_{21} + \lambda_{23})}{\lambda_{12} \lambda_{23}}, \quad (10)$$

$$F_2 = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{23}}{\lambda_{12} \lambda_{23}} + \frac{1}{\lambda_{23}} + \frac{1}{\lambda_{34}} + \frac{1}{\lambda_{45}} + \frac{1}{\lambda_{51}}, \quad (11)$$

$$F_3 = \frac{F_1}{\lambda_{61}} \cdot \quad (12)$$

以上(8)式和(9)式则分别描述了作物生物量的相对增长与绝对增长的变化规律. 再将(9)离散化,可得相应的差分方程:

$$W(t + \Delta t) = \left[1 + \frac{(1 - F_1 W(t))}{F_2 + F_3 W(t)} \cdot \Delta t \right] \cdot \quad (13)$$

假定初值 $W|_{t=0} = W_0$, 适当选择步长 Δt , 即可用(13)式模拟作物生长过程.

1.4 模型主要参数的估算公式

在作物生长系统的 CFM 模型中,主要参数是状态转移速率 λ_{ij} (其量纲为 t^{-1}). 下边分别给出各转移速率的计算办法.

1) 关于参数 $\lambda_{12}, \lambda_{23}, \lambda_{34}, \lambda_{45}$ 的估算,由前状态分析可知,它们分别受制于外力因子光照、温度、水分与土壤养分等资源量对生长系统的输入情况,可以认为它们与各资源量的大小成正比,则有

$$\lambda_{12} = \alpha_1 I, \quad \lambda_{23} = \alpha_2 T, \quad \lambda_{34} = \alpha_3 H, \quad \lambda_{45} = \alpha_4 N \cdot \quad (14)$$

式中 I, T, H, N 分别表示外力因子光照、温度、水分和土壤养分的有关量化指标,为使其具有可比性,均取相对值(即观测值与最适值之比); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为各资源相应的利用指数,由实验观测分析确定.

2) 动力系统模型的集合参数 F_1, F_2, F_3 的计算公式

将(14)式分别代入(10)、(11)、(12)式得

$$F_1 = \frac{\alpha_6 (\lambda_{21} + \alpha_2 T)}{\alpha_1 \alpha_2 I T}, \quad (15)$$

$$F_2 = \frac{\lambda_{21} + \alpha_2 T}{\alpha_1 \alpha_2 I T} + \frac{1}{\alpha_2 T} + \frac{1}{\alpha_3 H} + \frac{1}{\alpha_4 N} + \frac{1}{\lambda_{51}}, \quad (16)$$

$$F_3 = \frac{\alpha_6 (\lambda_{21} + \alpha_2 T)}{\alpha_1 \alpha_2 I T \lambda_{61}} \cdot \quad (17)$$

利用以上(15)、(16)和(17)式可以计算出诸集合参数·式中的 λ_{21} 、 λ_{51} 和 λ_{61} 等参数,根据对春小麦有关实验分析,并参照同类研究(Olson, 1985)^[6]对属于 C_3 植物的春小麦,其估算值为 $\lambda_{21} = 0.06$, $\lambda_{51} = 4.5$, $\lambda_{61} = 0.12$, $\alpha_6 = 0.07 \sim 0.13$ 。

另外,模型中生物量初值 W_0 ,由实验测定的多个样方的均值确定($t = 0$ 时刻)。

2 作物的增长机制过程分析

2.1 作物生长曲线

由前(9)式知作物增长方程为

$$\frac{dW}{dt} = \frac{(1 - F_1 W) W}{F_2 + F_3 W}, \quad (18)$$

$$W|_{t=0} = W_0.$$

采用分离变量法解之得

$$F_2 \ln \frac{W}{W_0} - \left[F_2 + \frac{F_3}{F_1} \right] \ln \frac{1 - F_1 W}{1 - F_1 W_0} = t. \quad (19)$$

(19)式即为作物生长曲线,它反映生物量随时间 t 的增长规律。

2.2 最速生长点与饱和值

若记 $F(W) = (1 - F_1 W) W / (F_2 + F_3 W)$,则 $F(W)$ 表示作物生物量的绝对增长率,对 $F(W)$ 求导得

$$F'W = \frac{F_2 - 2F_1 F_2 W - F_1 F_3 W^2}{(F_2 + F_3 W)^2}.$$

并令 $F'(W) = 0$,解得(舍去负值):

$$W^* = \frac{\sqrt{F_2^2 + F_2 F_3 / F_1} - F_2}{F_3}. \quad (20)$$

可以证明 $F''(W^*) < 0$,所以 $W = W^*$ 时 $F(W)$ 取得极大值,因此生物量水平 $W = W^*$ 为最速增长点。又因作物生长达到饱和值时具有零增长率,即 $F'(W) = 0$ 。

所以有

$$\frac{(1 - F_1 W) W}{F_2 + F_3 W} = 0.$$

由此得生物量饱和值为 $W_{\max} = 1/F_1$ 。

2.3 作物增长过程分析

据此,可对模型(18)表示的作物增长机制作如下分析:当 $0 < W < W^*$ 时, $F'(W) > 0$, $F(W)$ 单调上升,即随作物生物量增加其绝对增长率逐步增大;当 $W = W^*$ 时,绝对增长率达最大值 $F(W^*)$;当 $W^* < W < W_{\max}$ 时, $F'(W) < 0$, $F(W)$ 单调下降,即随作物生物量 W 的增加,其绝对增长率下降,最终达到零增长率。

3 实例的计算分析

作物生长模拟与选优,被认为是对作物生长动力系统进行有效调控和系统功能优化的研究。即是以提高作物产量为目标,对各种人工控制措施下的作物生长过程计算机进行模拟与大田验证实验。以下根据我们在甘肃中部半干旱区所作的水肥配置大田验证实验结果,采用上述所建作物生长动力系统CTM模型的模拟方法,进行模拟计算与分析。

3.1 试验设置与模型参数

水肥控制试验布置在甘肃中部的水土保持试验站的水平梯田上, 地处海拔 2 040 m, 试验区土壤为黄绵土, 田间持水量为 22%, 指示作物选用当地抗旱良种定西 24 号(春小麦)· 3 月 20 日播种, 播种量按 21 g/m^2 折算, 7 月底收获· 试验采用 $3 \times 4 \text{ m}^2$ 小区进行, 随机排列, 重复一次· 水肥因子控制措施: 水分梯度上设置丰水、平水、干旱 3 种情况; 肥力梯度上设置高肥、中肥、低肥、对照地(不施肥) 4 个等级, 二者交叉配置· 关于水肥因子的控制方法如下:

1) 水分因子控制方法: 采用活动雨棚, 遮住生长期降水, 人工浇水模拟自然降水· 整个春小麦生育期内, 丰水控制在 $500 \text{ mm} \sim 550 \text{ mm}$, 平水控制在 $400 \text{ mm} \sim 420 \text{ mm}$ (该地历年平均降水量), 干旱控制在 $200 \text{ mm} \sim 240 \text{ mm}$ ·

2) 肥力因子控制方法: 各试验小区普施少量有机肥, 然后使用氮磷混合化肥控制施肥量· 其中高肥按每个小区施 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 和尿素分别为 270 g 和 175.5 g ; 中肥分别为 180 g 和 117 g ; 低肥为 90 g 和 58.5 g ; 对照地不施化肥, 以上施肥量按 $N:P = 1.5:1$ 设置, 随播种条施·

3) 试验采用定时定位观测方法: 每个物候期观测一次, 观测指标包括生物量、叶面积、根体积、每亩穗数、穗均粒数、千粒重等· 在作物生长各阶段, 对 $0 \text{ cm} \sim 30 \text{ cm}$, $30 \text{ cm} \sim 60 \text{ cm}$ 土层分别随机取样, 采用烘干法测定土壤含水率; 用重铬酸钾法测定土壤有机质含量; 用碳酸氢钠法测定速效磷; 用扩散吸收法测定水解氮·

根据试验结果和参数估算公式计算所得结果如表 2 所示·

表 2 各种试验条件下的模型参数值

参数	丰水				平水				干旱			
	对照 空白	低肥 (L)	中肥 (M)	高肥 (H)	对照 空白	低肥 (L)	中肥 (M)	高肥 (H)	对照 空白	低肥 (L)	中肥 (M)	高肥 (H)
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766	0.766
H	0.875	0.875	0.875	0.875	0.75	0.75	0.75	0.75	0.588	0.588	0.588	0.588
N	0.690	0.793	0.896	1.000	0.690	0.793	0.896	1.000	0.690	0.793	0.896	1.000
α_1	0.589	0.733	0.786	0.990	0.426	0.692	0.917	0.876	0.292	0.367	0.444	0.419
α_2	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662	0.662
α_3	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.910	0.900	0.900	0.900	0.900
α_4	0.87	0.82	0.91	0.95	0.86	0.89	0.86	1.00	0.77	0.65	0.62	0.45
λ_{21}	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
λ_{51}	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
λ_{61}	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
α_6	0.076 4	0.083 7	0.070 7	0.070 7	0.126 5	0.118 0	0.091 9	0.092 1	0.121 5	0.130 6	0.100 0	0.096 4
$\varepsilon(H)$	0	0.26	0.33	0.46	0	0.20	0.27	0.36	0	0.16	0.23	0.17
W_0	0.091	0.105	0.118	0.132	0.080	0.092	0.104	0.110	0.076	0.087	0.096	0.084

3.2 系统模拟公式

春小麦生长系统的模拟公式如下:

$$W(t + \Delta t) = \left[1 + \frac{(1 - F_1 W(t))}{F_2 + F_3 W(t)} \cdot \Delta t \right] \cdot W(t), \quad (21)$$

$$W_{t=0} = W_0,$$

其中集合参数分别为:

$$F_1 = \frac{\alpha_6(\lambda_{21} + \alpha_2 T)}{\alpha_1 \alpha_2 IT}, \quad (22)$$

$$F_2 = \frac{\lambda_{21} + \alpha_2 T}{\alpha_1 \alpha_2 IT} + \frac{1}{\alpha_2 T} + \frac{1}{\alpha_3 H + \varepsilon(H)} + \frac{1}{\alpha_4 N} + \frac{1}{\lambda_{61}}, \quad (23)$$

$$F_3 = \frac{F_1}{\lambda_{61}}. \quad (24)$$

以上 F_2 中 $\varepsilon(H)$ 表示适量施肥对水分的补偿作用参数,按下式计算:

$$\varepsilon(H) = \frac{V_i - V_0}{V_i}, \quad (25)$$

式中 V_0 为不施肥条件春小麦根体积极观测值, V_i 为第 1 条施肥条件下的根体积极观测值。

根据以上公式和表 2 数值计算得的各种水肥条件下的模型集合参数如表 3。

表 3 各种水肥条件下作物生长动力系统的集合参数值

水肥条件		集合参数值		
		F_1	F_2	F_3
丰水	空白	0.145 1	7.014 7	1.208 8
	低肥	0.127 7	6.204 5	1.064 2
	中肥	0.100 6	5.734 2	0.838 3
	高肥	0.079 9	5.172 5	0.665 5
平水	空白	0.332 1	7.969 8	2.767 4
	低肥	0.190 7	6.360 4	1.589 1
	中肥	0.112 1	5.761 4	0.934 0
	高肥	0.117 6	5.430 1	0.979 8
干旱	空白	0.465 3	9.436 9	3.877 7
	低肥	0.398 0	8.411 0	3.316 4
	中肥	0.251 9	7.645 2	2.099 0
	高肥	0.257 3	8.300 1	2.144 1

3.3 春小麦生长动力系统模拟结果

模拟计算中,选取 $\Delta t = 1 \text{ d}$, $0 \leq t \leq 106 \text{ d}$,根据以上模拟公式和表 2、表 3 数值,经计算得各种水肥条件的作物生长曲线如图 2、图 3 和图 4。以上模拟曲线图 2、图 3 和图 4 分别描述了在不同水肥因子组合下,春小麦生物量在时间梯度上的变化情况,其模拟曲线与水肥配置正交实验结果基本一致。

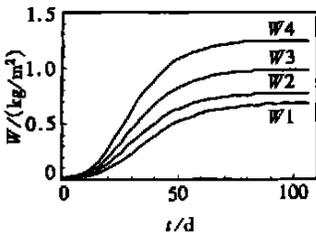


图 2 丰水下的春小麦生长动力模拟曲线

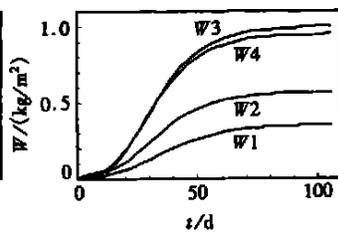


图 3 平水下的春小麦生长动力模拟曲线

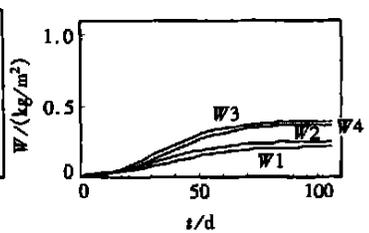


图 4 干旱下的春小麦生长动力模拟曲线

另外,各种水肥条件下的生物量的饱和值为 $W_{\max} = 1/F_1$,该值表示在一定外力因子作用

下春小麦生物量所能达到的最大值, 即其理论产量。根据表 3 数据计算得的各种试验条件下的理论产量见表 4, 将生物量换算为春小麦籽粒产量, 它与试验值之间具有较好的一致性(见表 4)。

表 4 模拟结果分析表

水分条件	丰水				平水				干旱			
肥力条件	空白	低肥	中肥	高肥	空白	低肥	中肥	高肥	空白	低肥	中肥	高肥
生物量饱和值 $100 \times W_{\max} /$ (g/m^2)	0.891 8	7.830 9	9.940 4	12.515 6	3.011 1	5.243 8	8.920 6	8.503 4	2.149 2	2.512 6	3.969 8	3.886 5
折算系数 f	0.37	0.37	0.37	0.37	0.36	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35	0.35	0.35
理论产量 $G_t / (g/m^2)$	225.00	289.74	367.79	463.08	108.40	188.78	321.14	306.12	75.22	87.94	138.94	136.03
观测产量 $G_o / (g/m^2)$	256.19	290.01	363.55	465.72	107.93	189.16	319.46	308.05	76.07	89.15	136.23	134.17

注: 折算系数 f 为干物质换算为籽粒产量的经济系数, 表中观测产量为 6 个样方的平均值。

4 结 论

1) 本文从生物力学角度分析了多种环境外力因子作用下作物生长动力系统的机理, 并将新颖的 CTM 建模方法, 应用于半干旱区作物春小麦生长系统的研究, 建立了有效的生长模型和系统模拟方法。文中在以下几个方面拓广和发展了 R. L. J. Olson 等人^[6]的工作。首先是根据春小麦生长的生态条件, 适当扩大了环境外力因子的维数, 增加了温度因子, 并提出了适用于春小麦的 CTM 建模方法的有关条件; 其次, 以环境资源因子转化为农田初级生长力为主, 提出确定资源指标与资源利用系数等模型参数的新方法, 使该模型具有实用性和可操作性; 另外, 建立了生长系统模拟方法, 进行了水肥配置正交试验的系统模拟与效果分析, 扩展了该模型的应用范围。

2) 该动力模型与其它植物生长模型相比, 其优越性在于从客观和微观相结合上反映了资源利用的多维性, 揭示了资源转化过程, 所建作物生长系统模拟方法, 具有先进性和可操作性, 实际模拟结果与大田观测结果能很好吻合。从表 4 可以看出, 依据模拟结果计算的理论产量与观测值是一致的, 这验证了模型的有效性。

3) 根据表 4 结果可得如下分析结论: 在丰水条件下以施高肥的产量最高, 其产量达到 $463.08 g/m^2$; 在平水和干旱条件下, 施中肥产量最高, 其产量分别达到 $321.14 g/m^2$ 和 $138.94 g/m^2$ 。由于诸环境外力因子中, 养分因子是可控因素, 通过合理施肥, 不仅可以控制土壤中的养分, 而且在一定程度上可以补偿干旱区农田土壤水分之不足, 因此, 该模拟结果对于指导农田合理施肥, 增加产量有实践的现实意义。

[参 考 文 献]

- [1] Gates D J. Competition between two types of plants located at random on a lattice[J]. Math Biosci, 1980, 48(3): 157—194.
- [2] McMartrie R, Wolf L. A model of competition between trees and grass for radiation, water and nutrients[J]. Ann Bot, 1983, 52(4): 449—458.
- [3] Walker B H, Ludwig D, Holling C S, et al. Stability of semi-arid savanna grazing systems[J]. J Ecol,

- 1981, **69**: 473—498.
- [4] 张银萍, 张继涛. 三种群 Lotka-Volterra 非周期食饵-捕食系统的持久性[J]. 应用数学和力学, 2000, **21**(8): 792—797.
- [5] 郭瑞海, 袁晓风. 一类微生物种群生态数学模型的 Hopf 分支[J]. 应用数学和力学, 2000, **21**(7): 693—670.
- [6] Olson R L J, Sharpe P J H, Wu Hsin-I. Whole plant modelling: A continuous time Markov (CTM) approach[J]. Ecological Modelling 1985, (29): 171—187.
- [7] Sharpe P J H, Walker J, Wu Hsin-I. Physiologically based continuous time Markov approach plant growth modelling in semi-arid woodlands[J]. Ecological Modelling, 1985, (29): 189—213.
- [8] Harper J L. Population Biology of Plants [M]. London/New York Academic Press, 1977, 892.

The Dynamic Model of Crop Growth System and Numerical Simulation of Crop Growth Process Under the Multi-Environment External Force Action

LI Zi_zhen¹, WANG Wan_xiong², XU Cai_lin²

(1. Department of Mathematics, Lanzhou University, Lanzhou 730070, P. R. China ;

2. State Key Laboratory of Arid Agroecology, Lanzhou University,
Lanzhou 730070, P. R. China)

Abstract: According to the biomechanic theory and method, the dynamic mechanism of crop growth under the external force action of multi-environment factors (light, temperature, soil and nutrients etc.) was comprehensively explored. Continuous time Markov (CTM) approach was adopted to build the dynamic model of the crop growth system and the simulated numerical method. The growth rate responses to the variation of the external force and the change of biomass saturation value were studied. The crop grew in the semiarid area was taken as an example to carry out the numerical simulation analysis, therefore the results provide the quantity basis for the field management. Comparing the dynamic model with the other plant growth model, the superiority of the former is that it displays multi-dimension of resource utilization by means of combining macroscopic with microcosmic and reveals the process of resource transition. The simulation method of crop growth system is advanced and manipulated. A real simulation result is well identical with field observational results.

Key words: external force of environment; crop growth; dynamic model; numerical simulation