

中稻密植生态系统数学模型的初步研究*

裴纲文 陈学良

(中国科学院成都生物研究所七室)

摘 要

这篇稿件分别描述1982年双流中稻的 3×7 、 5×7 及 7×7 寸²密植生态系统。我们假定该系统为线性及非时变和小区的肥水条件一致,这就形成单输入、单输出并具有反馈的线性非时变生态系统。根据系统的方块图,求得主要环节及该系统的传递函数的一般公式,各密植系统的实际传递函数即因此产生。通过它们的稳定性判断及灵敏度分析,选出 5×7 寸²系统。但这三种密植的亩产相差不大(最大之差为30斤)。各密植系统的光能利用率不高,不及1.5%。如提高光能利用率,可能得到大量干物质及高额产量,这必须找出干物质最多时的苗数及叶面积指数的最佳值。要保证足够的苗数及适当的叶面积,只有在肥料上下功夫,所以我们把选出 5×7 寸²扩大面积试种,把原来每亩纯氮用量17斤改为26斤,终于得到比以前好的结果。

四川盆地云雾多,日照少,为全国之冠。虽在一年中夏季6—8月日照时数比冬季多,但仍是阴天多,晴天少。这时正是中稻旺盛生长的时候,极需光能利用,在盆地东南的重庆市,经该市农科所测定,中稻对光能利用率为1.5%;我们在成都平原的双流县求得的稍不足此数。究其原因,除光照时数少外,还没有在栽培上采取措施,使其对光能利用率提高。密植是提高光能利用率的措施之一,南京气象学院所编农业气象学指出,密植能够提高单位面积的个数,增大叶面积,可以充分发挥光合效应,产量自然也高。但叶面积过大,叶片之间互相遮荫,部分叶片得不到良好的光照条件,产量也随之下降,越密这种情况越严重。可见密植虽能提高光能利用率,却不是越密越好。为解决这个问题,于1982年6—8月在我所双流农场进行了3种密植(3×7 寸²、 5×7 寸²及 7×7 寸²)试验。所采用品种为双桂一号。

农业生态系统是农业生物与环境的相互联系而形成的整体。农业生产是在这个整体中进行的,为了获得很好的经济效果,人们总希望能够做到预报和控制生态系统的变迁,以及设计最佳生态系统,这些都是传统的生态学研究方法无能为力;统计生态学也不能阐述生态系统演变的内在联系。从六十年代开始,系统分析被引入生态学领域后,带来了光明前景,它以其数学概念和分析工具来研究实质因子,精确地表达各种因素间的因果规律,因此,用数学解决生态问题,首先是建立生态系统的数学模型,在生产实践中不断修正与改进,最终求得最佳模型,达到预期的目的。

系统分析之所以能用于生态系统的主要原因,就是生态系统的内部结构是不知的,或在短期内难于揭示清楚,不同于人造的工程系统。而系统理论允许那些不了解内部,只要通过实际观测,就能确定它们的输入与输出的关系,因此,我们可以把系统理论用于生态系统成为可能。

* 郭嘉诚、林双福二同志参加了部分工作

一、建立数学模型

为了便于研究系统,在自动控制系统中,还广泛地采用方块图。现拟订密植系统的方块图如下(图1)。

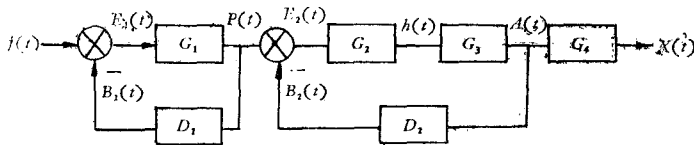


图1 密植系统的方块图
fig. 1 block diagram of density system

图中 $f(t)$ 、 $p(t)$ 、 $h(t)$ 、 $A(t)$ 及 $x(t)$ 分别为叶面总辐射、叶面积系数、光合利用辐射值、苗数及干物质重的时间 t 的函数; $B_1(t)$ 的潜热能使输入改变温度状况,呈现反馈作用;苗数的增减也能使叶面积发生变化,所以每苗叶面积系数 $B_2(t)$ 也是反馈现象。设 $E_1(t)$ 及 $E_2(t)$ 各为中间函数。

分析和设计控制系统的首要工作是确定系统的数学模型,因此,根据上列方块图,并把各种函数进行拉普拉斯变换,求传递函数如下:

(1) $f(s)$ 至 $P(s)$ 的传递函数

$$E_1(s) = f(s) - B_1(s) \quad G_1(s) = \frac{P(s)}{E_1(s)} = P(s) / [f(s) - B_1(s)]$$

$$P(s) = G_1(s)[f(s) - B_1(s)] \quad B_1(s) = D_1(s)P(s)$$

$$P(s) = G_1(s)[f(s) - D_1(s)P(s)]$$

$$\therefore P(s)/f(s) = G_1(s) / [1 + D_1(s)G_1(s)]$$

(2) $P(s)$ 至 $A(s)$ 的传递函数

$$E_2(s) = P(s) - B_2(s)$$

$$h(s) = G_2(s)E_2(s) = G_2(s)[P(s) - B_2(s)]$$

$$B_2(s) = D_2(s)A(s) \quad A(s) = G_3(s)h(s)$$

$$A(s) = G_2(s)G_3(s)[P(s) - D_2(s)A(s)]$$

$$\therefore A(s)/P(s) = G_2(s)G_3(s) / [1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]$$

(3) $A(s)$ 至 $x(s)$ 的传递函数

$$G_4(s) = x(s)/A(s)$$

故系统的总传递函数为

$$T(s) = x(s)/f(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) / [1 + D_1(s)G_1(s)][1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]$$

将各个因子的观测值记成时间 t (本试验中稻移栽至成熟时期的日数约90日,但由于从返青之日起,每隔5天记载苗数,叶面积及干物质一次,所以这里 t 不是代表一日为单位的日数,而是以5日为单位计)的函数(总辐射、光合利用辐射值,及蒸发消耗热为正弦函数,叶面积及苗数为 t 的二次函数,干物质为立方抛物线函数),再进行拉普拉斯变换,代入上列

通式, 求得每个系统的实际函数如表 1。

表 1 各系统的实际传递函数

table 1. practical transfer function of each system

系 统 传 递 函 数	$3 \times 7 \text{ 寸}^2$	$5 \times 7 \text{ 寸}^2$	$7 \times 7 \text{ 寸}^2$
$P(s)$	$(4.29s^2 + 0.015s + 2.84 \times 10^{-4})$ $(22.5^2 + s^2)$	$(3.621s^2 + 0.0152s + 2.802 \times 10^{-4})$ $(22.5^2 + s^2)$	$(3.21s^2 + 0.133s + 2.37 \times 10^{-4})$ $(22.5^2 + s^2)$
$f(s)$	$s^2(0.165s^2 + 1.285s + 90.619)$	$s^2(0.114s^2 + 0.988s + 65.964)$	$s^2(0.029s^2 + 0.569s + 117.956)$
$A(s)$	$11.76s^2 + 0.0633s + 1.682 \times 10^{-3}$	$17.389s^2 + 0.103s + 2686 \times 10^{-3}$	$18.115s^2 + 0.1203s + 2.856 \times 10^{-3}$
$P(s)$	$4.29s^2 + 0.015s + 2.84 \times 10^{-4}$	$3.621s^2 + 0.0152s + 2.802 \times 10^{-4}$	$3.21s^2 + 0.133s + 2.37 \times 10^{-4}$
$x(s)$	$0.199s^3 + 0.391s^2 + 0.882s + 0.234$	$4.23s^3 - 0.755s^2 + 0.201s + 0.109$	$1.215s^3 + 0.148s^2 + 0.594s - 0.108$
$A(s)$	$s(11.76s^2 + 0.0633s + 1.682 \times 10^{-3})$	$s(17.389 + 0.103s + 2.686 \times 10^{-3})$	$s(18.115s^2 + 0.1203s + 2.856 \times 10^{-3})$
总传递函数	$(0.199s^3 + 0.391s^2 + 0.882s + 0.234)$ $(22.5^2 + s^2)$ $s^3(0.165s^2 + 1.285s + 90.619)$	$(4.23s^3 - 0.755s^2 + 0.201s + 0.109)$ $(22.5^2 + s^2)$ $s^3(0.114s^2 + 0.988s + 65.964)$	$(1.215s^3 + 0.148s^2 + 0.594s - 0.108)$ $(22.5^2 + s^2)$ $s^3(0.029s^2 + 0.569s + 117.956)$

上列各系统的传递函数究竟以何者为好, 难于直接判断, 故在下面对它们的稳定性及灵敏度进行分析, 作出较好密植的选择。

二、稳定性的判断

任何系统在扰动作用下都会偏离原来平衡状态, 待扰动消失后, 自行恢复原来状态的性能, 叫做稳定性。考查农田生态系统的稳定性, 希望它受干扰后偏离平衡状态小, 农作物能够顺利地生长发育过程, 最后获得可观的产量。若偏离相当大, 不能保持生态平衡, 那就无法挽回了。但这种事件出现的机会确实是非常小的。

我们对系统稳定与否的判断, 不仅了解系统的稳定性, 更重要的是掌握系统的稳定程度, 所以采用了相位裕量及增益裕量。现将这两种计算方法简介于后:

设某个闭环系统对应的开环传递函数为

$$H(s) = \frac{K(s+a_1)(s+a_2)}{s(s+b_1)(s^2+b_2s+b_3)}$$

将上式改写成如下形式

$$H(s) = \frac{Ka_1a_2}{b_1b_3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{s}{a_1}\right)\left(1 + \frac{s}{a_2}\right)}{s\left(1 + \frac{s}{b_1}\right)\left(\frac{s^2}{b_3} + \frac{b_2}{b_3}s + 1\right)}$$

$$H(j\omega) = \frac{Ka_1a_2}{b_1b_3} \cdot \frac{\left(1 + \frac{j\omega}{a_1}\right)\left(1 + \frac{j\omega}{a_2}\right)}{(j\omega)\left(1 + \frac{j\omega}{b_1}\right)\left(1 + j\omega\frac{b_2}{b_3} + \frac{(j\omega)^2}{b_3}\right)}$$

幅值函数 $|H(j\omega)|$ 和相位函数分别为

$$|H(j\omega)| = \frac{Ka_1a_2}{b_1b_3} \cdot \frac{\left|1 + \frac{j\omega}{a_1}\right| \left|1 + \frac{j\omega}{a_2}\right|}{\left|j\omega\right| \left|1 + \frac{j\omega}{b_1}\right| \left|1 + j\omega \frac{b_2}{b_3} + \frac{(j\omega)^2}{b_3}\right|}$$

$$\text{和} \quad Q(\omega) = \angle\left(1 + \frac{j\omega}{a_1}\right) + \angle\left(1 + \frac{j\omega}{a_2}\right) - \angle(j\omega) - \angle\left(1 + \frac{j\omega}{b_1}\right) - \angle\left(1 + j\omega \frac{b_2}{b_3} + \frac{(j\omega)^2}{b_3}\right) \quad (\text{B.P. 拉斯, 1982})$$

设 $|H(j\omega)| = 1$ ，根据此方程解得 ω 值，以之代入相位函数，则得相位值，即有相位裕量 $= 180^\circ + \text{相位值}$ 。又设 $Q(\omega) = -180^\circ$ ，把由此式求得的 ω 值代入幅值函数，即得幅值，就有增益裕量 $= 20\lg(\text{幅值})^{-1}$ （分贝）（李龙森，1980）。

根据上面所介绍的方法，求得各系统的相位裕量及增益裕量，如表2所列：

表 2 各系统的相位裕量（度）及增益裕量（分贝）
table 2 phase margin (d) and gain margin (db) of each system

系 统	传递函数	$\frac{P(s)}{f(s)}$		$\frac{A(s)}{P(s)}$		$\frac{X(s)}{A(s)}$		总传递函数	
		相位裕量	增益裕量	相位裕量	增益裕量	相位裕量	增益裕量	相位裕量	增益裕量
$3 \times 7 \text{ 寸}^2$		194.981	23.479	180.509	19.016	119.075	3.849	81.115	0.848
$5 \times 7 \text{ 寸}^2$		263.345	1.708	59.563	8.821	212.000	12.219	90.000	27.052
$7 \times 7 \text{ 寸}^2$		84.577	16.595	179.996	24.138	115.468	11.213	32.141	0.195

各个系统的相位裕量及增益裕量分别大于 -180° 及0分贝，可以说各系统都是稳定的。但在程度上各有不同。首先就传递函数 $P(s)/f(s)$ 来说， $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 的叶面积比 $3 \times 7 \text{ 寸}^2$ 小，而大于 $7 \times 7 \text{ 寸}^2$ ，因此在它的叶面积上的总辐射，稍小于前者，却比后者丰富；蒸发消耗热量与后者接近，而不及前者且相差甚远，在这样的条件下，它的相差位裕量大，增益裕量小。又就 $A(s)/P(s)$ 来说， $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 的苗数虽多，而每苗平均叶面积小，所构成的相位裕量及增益裕量都不及 $3 \times 7 \text{ 寸}^2$ 及 $7 \times 7 \text{ 寸}^2$ 优越。再就 $x(s)/A(s)$ 及总传递函数来说， $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 的总辐射较多，蒸发耗热略小，苗数多，干物质重，所以它的相位裕量及增益裕量表现突出，为其他二规格所不及。总之， $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 虽有某点不足，但优点多，稳定程度高，没有什么疑虑的。

三、灵敏度的分析

系统的闭环传递函数 T ，对给定环节特性 K 的微分被定义为灵敏度。即

$$S_K^T = \frac{d \ln T}{d \ln K}, \text{ 这里 } T = \frac{C(s)}{R(s)}。$$

将上式写成如下的形式, 可获得更有意义的定义。

$$S_K^T = \frac{dT/T}{dK/K}$$

上式表明, T 对 K 微分的灵敏度是 T 的百分比的变化除以 K 的百分比的变化, 即由 K 的变化而引起 T 的变化 (Luxmoore 及 Holdman, 1981; 欣内尔斯, 1979)。

现将前面导出的密植系统的传递函数通式, 求灵敏度的通式如下:

(1) $\frac{P(s)}{f(s)}$ 的灵敏度

$\frac{P(s)}{f(s)}$ 的传递函数为

$$T_1 = \frac{G_1}{1 + D_1 G_1}$$

$$S_{G_1}^{T_1} = \frac{dT_1/T_1}{dG_1/G_1} = \frac{G_1}{T_1} \cdot \frac{dT_1}{dG_1} \quad \frac{G_1}{T_1} = 1 + D_1 G_1$$

$$\frac{dT_1}{dG_1} = \frac{(1 + D_1 G_1) - D_1 G_1}{(1 + D_1 G_1)^2} = \frac{1}{(1 + D_1 G_1)^2}$$

$$S_{G_1}^{T_1} = (1 + D_1 G_1) \cdot \frac{1}{(1 + D_1 G_1)^2} = \frac{1}{1 + D_1 G_1}$$

$$\text{又} \quad \frac{d}{dD_1} [G_1 (1 + D_1 G_1)^{-1}] = -G_1^2 (1 + D_1 G_1)^{-2} \quad \frac{D_1}{T_1} = \frac{D_1 (1 + D_1 G_1)}{G_1}$$

$$S_{D_1}^{T_1} = \frac{dT_1}{dD_1} \cdot \frac{D_1}{T_1} = \frac{D_1 (1 + D_1 G_1)}{G_1} \cdot \left[-\frac{G_1^2}{(1 + D_1 G_1)^2} \right] = -\frac{D_1 G_1}{1 + D_1 G_1}$$

(2) $\frac{A(s)}{P(s)}$ 的灵敏度

$\frac{A(s)}{P(s)}$ 的传递函数为

$$T_2 = G_2 G_3 / (1 + D_2 G_2 G_3)$$

$$S_{G_2}^{T_2} = \frac{dT_2/T_2}{dG_2/G_2} = \frac{G_2}{T_2} \cdot \frac{dT_2}{dG_2}$$

$$\frac{G_2}{T_2} = \frac{1 + D_2 G_2 G_3}{G_3}$$

$$\frac{dT_2}{dG_2} = \frac{(1 + D_2 G_2 G_3) G_3 - D_2 G_2 G_3}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2} = \frac{G_3}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2}$$

$$S_{G_2}^T = \frac{G_2}{T_2} \cdot \frac{dT_2}{dG_2} = \frac{1 + D_2 G_2 G_3}{G_3} \cdot \frac{G_3}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2} = \frac{1}{1 + D_2 G_2 G_3}$$

同理

$$S_{G_3}^T = \frac{1}{1 + D_2 G_2 G_3}$$

$$S_{D_2}^T = \frac{dT_2/T_2}{dD_2/D_2} = \frac{D_2}{T_2} \cdot \frac{dT_2}{dD_2}$$

$$\frac{dT_2}{dD_2} = \frac{0 - G_2^2 G_3^2}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2} = - \frac{G_2^2 G_3^2}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2}$$

$$\frac{D_2}{T_2} = \frac{D_2 (1 + D_2 G_2 G_3)}{G_2 G_3}$$

$$\begin{aligned} S_{D_2}^T &= \frac{D_2}{T_2} \cdot \frac{dT_2}{dD_2} = \frac{D_2 (1 + D_2 G_2 G_3)}{G_2 G_3} \cdot \left[- \frac{G_2^2 G_3^2}{(1 + D_2 G_2 G_3)^2} \right] \\ &= - \frac{D_2 G_2 G_3}{1 + D_2 G_2 G_3} \end{aligned}$$

(3) $\frac{x(s)}{A(s)}$ 的灵敏度 $\frac{x(s)}{A(s)}$ 的传递函数为

$$T_3 = G_4$$

 T_3 对 G_4 的微分等于 1, 即 $S_{G_4}^T = 1$ 。

(4) 总传递函数的灵敏度

总传递函数为

$$T = G_1 G_2 G_3 G_4 / [(1 + D_1 G_1)(1 + D_2 G_2 G_3)]$$

按照前面的方法, 求得总传递函数的灵敏度如下:

$$S_{G_1}^T = \frac{1}{1 + D_1 G_1} \quad S_{G_2}^T = \frac{1}{1 + D_2 G_2 G_3}$$

$$S_{G_3}^T = \frac{1}{1 + D_2 G_2 G_3} \quad S_{G_4}^T = 1$$

$$S_{D_1}^T = - \frac{1}{1 + D_1 G_1} \quad S_{D_2}^T = - \frac{D_2 G_2 G_3}{1 + D_2 G_2 G_3}$$

根据上面的通式, 求得各系统的灵敏度的代数式, 进行拉普拉斯的反变换, 即时间 t 的函数, 当设 $t = 5$ 时, 就有灵敏度的实际值, 如表 3 所列。

表 3 各系传递函数的灵敏度
table 3 sensitivity of each systematic transfer function

系 统	灵 敏 度	$\frac{P(s)}{f(s)}$	$\frac{A(s)}{P(s)}$	$\frac{x(s)}{A(s)}$	总传递函数
$3 \times 7 \text{ 寸}^2$	$S_{G_1}^T$ (sensitivity of T to G_1)	3.492×10^{-2}			3.492×10^{-2}
	$S_{D_1}^T$ (sensitivity of T to D_1)	3.937×10^{-2}			5.937×10^{-2}
	$S_{G_2}^T$ (sensitivity of T to G_2)		0.109		0.109
	$S_{G_3}^T$ (sensitivity of T to G_3)		0.109		0.109
	$S_{D_2}^T$ (sensitivity of T to D_2)		-0.537		-0.537
	$S_{G_4}^T$ (sensitivity of T to G_4)			1	1
$5 \times 7 \text{ 寸}^2$	$S_{G_1}^T$ (sensitivity of T to G_1)	1.847×10^{-4}			1.847×10^{-4}
	$S_{D_1}^T$ (sensitivity of T to D_1)	1.765×10^{-4}			1.765×10^{-4}
	$S_{G_2}^T$ (sensitivity of T to G_2)		0.262		0.262
	$S_{G_3}^T$ (sensitivity of T to G_3)		0.262		0.262
	$S_{D_2}^T$ (sensitivity of T to D_2)		0.238		0.238
	$S_{G_4}^T$ (sensitivity of T to G_4)			1	1
$7 \times 7 \text{ 寸}^2$	$S_{G_1}^T$ (sensitivity of T to G_1)	2.843×10^{-18}			2.834×10^{-18}
	$S_{D_1}^T$ (sensitivity of T to D_1)	3.789×10^{-18}			3.789×10^{-18}
	$S_{G_2}^T$ (sensitivity of T to G_2)		2.887×10^{-2}		2.887×10^{-2}
	$S_{G_3}^T$ (sensitivity of T to G_3)		2.887×10^{-2}		2.887×10^{-2}
	$S_{D_2}^T$ (sensitivity of T to D_2)		3.538×10^{-2}		3.538×10^{-2}
	$S_{G_4}^T$ (sensitivity of T to G_4)			1	1

上表表明, $3 \times 7 \text{ 寸}^2$ 叶面积大, 吸收光量多, 蒸发潜热不少, 所以 $S_{G_1}^T$ 及 $S_{D_1}^T$ 高。 $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 的 $S_{G_2}^T$ 及 $S_{D_2}^T$ 虽不及 $3 \times 7 \text{ 寸}^2$, 但比 $7 \times 7 \text{ 寸}^2$ 好, 特别是光合作用强, 苗数多, 因而 $S_{G_2}^T$ 、 $S_{G_3}^T$ 及 $S_{D_2}^T$ 值突出, 反为 $3 \times 7 \text{ 寸}^2$ 所不及。 $7 \times 7 \text{ 寸}^2$ 除 $x(s)/A(s)$ 的灵敏度与 $3 \times 7 \text{ 寸}^2$ 、 $5 \times 7 \text{ 寸}^2$ 一致外, 其他的灵敏度都弱。

四、小 结

1. 我们作了三个假定 (所研究的系统是线性的, 系统的微分方程的系统不随时间变化, 3 种密植小区的肥水条件一致), 使所研究的系统成为单输入、单输出、并具有反馈的、线性非时变的生态系统。按所拟订方块图, 求出传递函数 $T(s)$ 。如已知系统的输入函数 $f(t)$, 对它进行拉普拉斯变换, 即得 $f(s)$, 利用 $x(s) = T(s)f(s)$, 又进行拉普拉斯反变换, 即得 $x(t)$ 。若能预报下一年的辐射值, 就能利用这个模型预报下一年的中稻产量。

2. 从上面讨论的结果表明, 各系统的传递函数通过稳定性判断及灵敏度分析, 以 $5 \times$

7 寸²好, 它的 $x(s)/A(s)$ 及总传递函数的相位裕量及增益裕量二者俱佳, 说明它们代表系统的稳定程度高, 其他二系统没有这样的表现。在灵敏度分析中, 它的 $S_{G_2}^T$ 、 $S_{G_3}^T$ 及 $S_{D_2}^T$ 值表现突出, 也为其他二系统所不及。

总的来说, 3 个密植系统不仅产量相差不大, 最多差 30 斤/亩, 而且各个系统对光能利用率都低, 不及 1.5%。要干物质累积得多, 产量也高, 必须提高光能利用率, 这要使作物叶面积及苗数达到干物质最多时的大小。为了满足这样的要求, 我们采用求最大值的方法, 首先把干物质函数对 t 求导数, 使其等于零, 即得 t 值, 将它分别代入叶面积系数及苗数的函数, 这就求得干物质最多 (以 t 值代入干物质函数即得) 时叶面积系数及苗数的最佳值。现以 7×7 寸² 系统为例, 它的干物质函数为

$$x_3(t) = 1.215 + 0.148t + 0.297t^2 - 0.018t^3$$

对 t 求导数, 并令它等于零, 即

$$0.054t^2 - 0.594t - 0.148 = 0$$

求得 $t = 11.24$ 及 -0.243 , 负值不符合要求, 可以略去, 仅将 11.24 分别代入叶面积系数及苗数的函数中, 各为 3.181 及 16.8 苗/穴, 这是保证干物质最多时 t 的最佳值。在农田生产的控制因素中, 我们把太阳辐射、雨量及肥料认为输入变量, 显然只有肥料是可以控制的。究竟用多少肥料可使叶面积系数及苗数为好, 根据本试验的肥料用量, 每亩为纯氮 17 斤, 拟改为 26 斤。假设 $F(s)$ 为肥料用量, 下图是把肥料作为输入时的闭环系统。

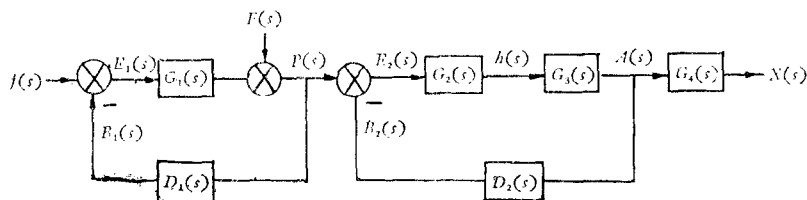


图 2 肥料作为输入时的闭环系统
fig. 2 closed loop system of fertilizer as input

上图除 $F(s)$ 外, 其他所代表函数与前面方块图相同, 不过这是进行了拉氏变换而已。

我们研究肥料对系统的影响, 此时可假定 $f(s) = 0$, 于是求得 $F(s)$ 作用下的传递函数为

$$T_F(s) = \frac{x_F(s)}{F(s)} = \frac{G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{[1 + D_1(s)G_1(s)][1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]}$$

另一面, 研究 $f(s)$ 作用于系统, 可假设肥料为零, 则

$$T_f(s) = \frac{x_f(s)}{f(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{[1 + D_1(s)G_1(s)][1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]}$$

根据迭加原理, 就得到 $F(s)$ 及 $f(s)$ 同时作用下的传递函数为

$$T(s) = T_F(s) + T_f(s) = \frac{[1 + G_1(s)]G_2(s)G_3(s)G_4(s)}{[1 + D_1(s)G_1(s)][1 + D_2(s)G_2(s)G_3(s)]}$$

在 1983 年仅将所选 5×7 寸² 扩大面积 (约 1.8 亩) 试种, 获得很好效果, 亩产 1,100 斤, 这初步说明该试验是有效的。

参 考 文 献

- 李龙森 1980 相位裕量和增益裕量. 自动控制理论. 第137—140页, 天津科学技术出版社。
- 齐文虎等 1981 应用系统理论的方法建立套作玉米系统的数学模型. 生态学报 1 (1): 1—11。
- B.P. 拉斯 1982 伯德图 信号、系统和控制 (中译本), 第385—398页, 科学出版社。
- S.M. 欣内尔斯 1979 灵敏度 现代控制系统理论及应用 (中译本), 第111—112页, 机械工业出版社。
- R.J. Luxmoore Janicel Stolzy and J.T. Holdman 1981 Sensitivity of a Soil-Plant-Atmosphere Model to Changes in Air Temperature, Dew Point Temperature and Solar Radiation. *Agricultural Meteorology* (Netherland Press) 23 (1981): 115—126.

A PRELIMINARY STUDY OF MATHEMATICAL MODEL ON DENSITY-PLANTING ECOSYSTEM IN MEDIAN RICE

Pei Jiongwen Cheng Xueling

(The Institute of Biology Chengdu, Academia Sinica)

The study has been finished on shuang liu farm of the Institute of Biology Chengdu, Academia Sinica.

The present paper deals with the ecosystem on Density-Planting patterns for 3×7 5×7 7×7 square cun in median rice. We Assume the system to be linear, and time-invariant, and the same conditions in fertilizer and water. Therefore we get linear time-invariant ecosystem of feedback of single input and single output. The general formula of transfer function and, of each main loop is obtained by systematic block diagram. Furthermore the practical transfer function of density system is obtained. The system for 5×7 square cun is the best by stability discrimination and sensitivity analysis for each transfer function. But three density planting patterns is shown as a small difference in seed weight per mu (the most quantitative difference 30 jing), and less the rate of utilization of the sunlight energy for each density system (under 1.5 per cent). However the most amount of dry material and ideal yield will be gained, if increasing the rate of utilization of the sun-light energy. Then it is necessary to found the best values of both the seedling number and the leaf area index respectively for getting the most amount of dry material. Perhaps the fertilizer can be controlled only as input factors for keeping enough seedling number and better leaf area. In order to examine the above points we chose the pattern in 5×7 square cun to be tested on the large area by fertilizer factors. The amount of pure nitrogen per mu is changed at 17 jing for 26 jing. The results are shown as the latter is better than the former.