第22卷 第4期 南京气象学院学报 Vol. 22 No. 4
1999年12月 Journal of Nanjing Institute of Meteorology Dec. 1999

文章编号: 1000-2022(1999)04- 0587- 09

水稻旱育抛秧生长发育的动态模拟模型

李湘阁 何海燕 景元书 顾显跃
(南京气象学院环境科学系, 南京 210044)

摘要: 通过分期播种田间试验资料, 建立水稻旱育抛秧生长发育的动态模拟模型, 包括叶面积发展、光合作用、呼吸作用、干物质积累与分配等。重点探讨叶面积发展与温度的关系、光合作用简化算法、净光合量的求算、分配系数随发育期的变化等。对抛秧稻和手插稻作对比分析, 在一定程度上阐述了抛秧稻的高产机制。各部分工作均紧扣气象因子的影响。

关 键 词: 旱育抛秧; 生长发育; 动态模拟
中图分类号: S162.5 文献标识码: A

水稻旱育抛秧技术已在全国范围内迅速推广。其栽培配套技术已有不少报道。但对其中的气象问题和高产机理尚缺乏深入探讨。为此本文建立一个抛秧水稻生长发育的动态模拟模型, 用于描述干物产量形成过程, 研究干物质形成与有关的生理、生态及气象因子的关系。同时分析抛秧稻和手插稻之间的差异, 力图寻求抛秧稻高产原因。

1 试验资料

田间分期播种试验地点位于南京气象学院西北 0.7 km 处, 地势平坦, 灌溉方便, 土壤肥力中等。1996 年采用武育粳3号, 分5月5日、5月15日、5月25日3个播期, 抛秧移栽, 不设对照。每5天记载1次株高、叶龄、分蘖数和抽穗后的灌浆速度; 每旬测定1次器官干、鲜重; 记载发育期。小气候方面, 观测分蘖、拔节、抽穗、成熟等关键发育期距地 0.2 m、2/3 植株高度、冠层上方晴天的温、光、湿、风等要素。应用南京气象学院农业气象试验站的气象观测资料, 经订正获得农田逐日小气候资料。用便携式光合仪测单叶光合作用。1997 年采用武育粳3号和杂交籼稻特优559, 分5月2日、5月11日、5月16日、5月23日、5月30日5个播期, 抛秧移栽, 中间3期设对照(手插移栽, 入土深度 5 cm)。观测项目在原来基础上增加比叶重和比茎重(单位面积茎鞘的重量), 每5天观测1次。

2 生长发育的动态模拟模型

收稿日期: 1999-03-24; 修订日期: 1999-07-19
基金项目: 江苏省南京市科委科技兴农资助项目
作者简介: 李湘阁, 男, 1939 年 4 月生, 教授

2.1 生育期模型

水稻是高温短日作物, 生育期受温度和日照时数的影响。水稻移栽至返青为移栽迟滞效应期。殷新佑[1]提出的生育期温度非线性模型较好地描述了水稻的感温性。

$$r_i = r_0\left[\frac{T_i - T_b}{T_0 - T_b} \times \left(\frac{T_c - T_i}{T_c - T_0}\right)^{\frac{T_c - T_0}{T_0 - T_b}}\right]^{\alpha}。 \quad (1)$$

其中, r_i 为第 i 天的实际发育速率; T_i 为第 i 天的日均温; T_0、T_b、T_c 分别为发育的最适、下限和上限温度; r_0 为生理发育速率, 即 $T_i = T_0$ 时的发育速率; α 为感温系数。文献[2]认为移栽迟滞与秧龄有关, Kropff[3]看法与此类似。我们在试验中观察到秧苗入土深度亦影响迟滞期长度。考虑到因子间的交互作用, 选择乘积形式综合描述水稻的感光性、感温性、移栽迟滞对生育期的影响, 构造生育期动态模拟模型

$$r_i = r_0\left[\frac{T_i - T_b}{T_0 - T_b} \times \left(\frac{T_c - T_i}{T_c - T_0}\right)^{\frac{T_c - T_0}{T_0 - T_b}}\right]^{\alpha} \times e^{\lambda(p_i - p_0)} \times e^{(\epsilon s + k)}。 \quad (2)$$

其中, p_0 为临界光长; p_i 为第 i 天的可照时数; λ 为感光系数; s 为移栽叶龄; ϵ 描述移栽叶龄对迟滞的影响程度; k 描述入土深度(cm) 对迟滞的影响程度。

岸田恭允[4]指出, 植物与昆虫光周期反应最低临界强度大多处于 1～5 lux, 太阳高度角一般在- 7.4 °～- 5.0 °。太阳高度角为- 6.0 °时的曙暮光为适宜的可供光周期反应研究的自然光照。由式 $\sin\beta = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\theta$(其中, δ 为赤纬; β 为太阳高度角; φ 为地理纬度; θ 为时角) 可知, 取 β 为- 6 °计算供光周期反应研究的可照时数为 $2\theta/15$(h)。

高亮之[5]指出, 水稻感光阶段在 4～5 叶至幼穗分化期。而一般品种叶龄达 4～5 叶时, 分蘖开始发生。因此, 水稻全生育期分 3 个时期: 播种—分蘖(发育阶段 DVS 为 0～1), 分蘖—抽穗(DVS 为 1～2), 抽穗—成熟(DVS 为 2～3)。确定粳稻播种—分蘖期间, T_b = 15 ℃, T_c = 35 ℃, T_0 = 25 ℃; 分蘖～抽穗期间, T_b = 18 ℃, T_c = 33 ℃, T_0 = 27 ℃; 抽穗—成熟期间, T_b = 14 ℃, T_c = 34 ℃, T_0 = 26 ℃[6]。杂交籼稻的温度指标比粳稻的对应值高 2 ℃。p_0 = 13.5(h)。

对于某个生育时期, 有

$$l = \sum_{i=1}^{n} r_i = \sum_{i=1}^{n} r_0\left[\frac{T_i - T_b}{T_0 - T_b} \times \left(\frac{T_c - T_i}{T_c - T_0}\right)^{\frac{T_c - T_0}{T_0 - T_b}}\right]^{\alpha} \times e^{\lambda(p_i - p_0)} \times e^{(\epsilon s + k)}。 \quad (3)$$

n 为该段发育期长度(d)。n、T_i、T_b、T_c、T_0、p_i、p_0、s 为已知值, 非线性参数 r_0、α、λ、ϵ、k 的确定采用 Levenberg-Marquardt[7]算法(见表 1)。

表 **1** 生育期各阶段的参数值

Table 1 Parameters for various phenological stages

	发育阶段	r_0	α	λ	ϵ	k
武育粳 3 号	播种—分蘖	0.059 0	4.861 2	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	分蘖—抽穗	0.021 2	5.925 7	- 2.180 8	- 0.030 6	- 0.049 0
	抽穗—成熟	0.023 7	2.075 1	0.000 0	0.000 0	0.000 0
杂籼特优 559	播种—分蘖	0.065 0	9.334 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	分蘖—抽穗	0.025 2	7.923 0	- 1.880 0	- 0.020 4	- 0.056 0
	抽穗—成熟	0.029 7	0.700 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

模拟结果以 1997 年第 4 期手插粳稻资料进行检验, 残差在前、中、后期各为 1 天, 全生育期误差为 3 天。分析参数发现: 前、中期 α 较后期大, 说明水稻的感温性在前、中期较强, 在后期

较弱。水稻的感光性只影响中期发育, 对前、后期无影响($\lambda = 0$) 。移栽叶龄越大, 入土越深, 缓苗期较长(ϵ、$k < 0$) 。从杂交籼稻和粳稻参数的对比分析上可看出, 杂交籼稻 r_0 较大, 说明其发育速率大, 发育期较粳稻短; α 较大, 说明感温性较强; λ 较小, 说明感光性较弱; 移栽叶龄(ϵ) 影响较弱; 入土深度对杂交稻比对粳稻影响大。从试验结果看, 粳稻手插比抛秧稻抽穗期晚 3 天, 成熟期晚 1 天。杂交籼稻手插比抛秧抽穗期晚 2 天, 成熟期晚 1 天。

2.2　叶面积发展子模型

目前, 叶面积的模拟模型有高亮之的分段模型、于强的水稻叶面积指数增长普适模型[8]、李春强的比叶重模型、王生明的 Logistic 修正方程等。但他们都没有考虑叶面积与温度的密切关系, 即高温地区叶片生长快, 叶片大而薄, 低温地区叶片短而厚。因此模型适用区域受到一定限制。

Horie 等[9] 认为, 在作物生长的早期阶段, 叶片互不遮荫时, 叶面积扩展不受有效碳水化合物的限制, 主要与温度有关。分两个阶段模拟叶面积扩展, 冠层未郁闭时, 叶面积增长是有效积温的函数

$$LAI_{T_s} = NL_{p0} \times e^{(R \times T_s)}。 \tag{4}$$

式中, LAI_{T_s} 为出苗后达一定温度(T_s) 时的叶面积指数; N 为秧田密度(株 · m^{-2}) ; L_{p0} 为出苗时单株初始叶面积(m^2/ 株) ; T_s 为指数生长阶段的有效积温; R 为叶面积指数相对增长率。出苗后叶面积指数的自然对数与相应的有效积温呈直线关系, 直线的斜率为叶面积指数的相对增长率, 由截距可求出出苗时初始叶面积指数。叶片之间严重遮荫(叶面积指数大于 1) 时, 叶面积增长阶段结束, 用比叶重法来计算叶面积指数

$$LAI(t) = \frac{W_{LVG}(t)}{S_{LA}(t)}。 \tag{5}$$

式中, $LAI(t)$ 为 t 时刻的叶面积指数; $W_{LVG}(t)$ 为 t 时刻单位面积上的绿叶干重(g · m^{-2}) ; $S_{LA}(t)$ 为 t 时刻的比叶重(g · m^{-2}) , 是发育阶段的函数。水稻茎的光合作用能力是叶光合作用能力的一半。因此, 可以茎面积指数(单位土地面积上茎干重除以比茎重) 的一半计入叶面积指数。用此方法解决了其他模型中存在的问题, 较为符合实际。

据试验资料, 得到比叶重、比茎重随发育期的变化方程(表 2) 。可以看出, 水稻比叶重在秧

表 **2**　比叶重、比茎重随发育期(***DVS***) 的变化方程

Table 2　Formula for changes of specific leaf weight and specific stem weight with phenological stage

	发育阶段	方程	样本数	相关比
比叶重	粳稻移栽前	$0.817e^{3.348DVS}$	12	0.75**
	粳稻抛秧移栽后	$-369.606+754.200DVS-504.142DVS^2+148.514DVS^3-16.191DVS^4$	45	0.81***
	粳稻手插移栽后	$-23.802+65.203DVS-12.799DVS^2$	28	0.79***
比茎重	粳稻移栽前	$-2\,222.160+3\,901.200DVS-1\,568.820DVS^2$	14	0.63*
	粳稻抛秧移栽后	$-1\,792.360+2\,043.060DVS-453.352DVS^2$	43	0.84***
	粳稻手插移栽后	$-1\,882.680+2\,140.800DVS-460.303DVS^2$	28	0.85***

注: * * * 通过 0.001 显著性检验, * * 通过 0.01 显著性检验, * 通过 0.05 显著性检验。

田期随发育期呈指数型增加, 移栽后有一定程度的下降。立苗后, 比叶重经历一段由迅速到缓慢的增长过程, DVS 为 2.52 时, 抛秧粳稻比叶重达到极值。DVS 为 2.55 时, 手插粳稻比叶重达到极值, 以后稍下降(与叶干物质转向穗部相对应) , 成熟期左右基本停止。比茎重在秧田期

随发育期呈二次函数变化,移栽后比茎重有一定程度的下降,立苗(指抛栽后苗体立直)以后,比茎重经历一段由迅速到缓慢的增长过程,*DVS* 为 2.25 时,抛秧粳稻比茎重达到极值。*DVS* 为 2.33 时,手插粳稻比茎重达到极值,以后下降(与茎干物质转向穗部相对应),成熟期左右基本停止。不同移栽方式,比叶重、比茎重随发育阶段的变化不同(见图 1、图 2)。发育前期,两者均在抛秧田中较大,可能与群体结构有关,抛秧田能容纳更多的物质;后期则在手插田中较大,可能与干物质的转移有关,手插田中物质转移不如抛秧田中彻底。

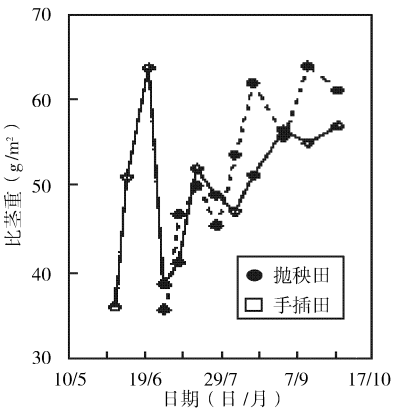

图 1 不同移栽方式比叶重对比

Fig. 1 Comparison of specific leaf weight between HSTT and MT

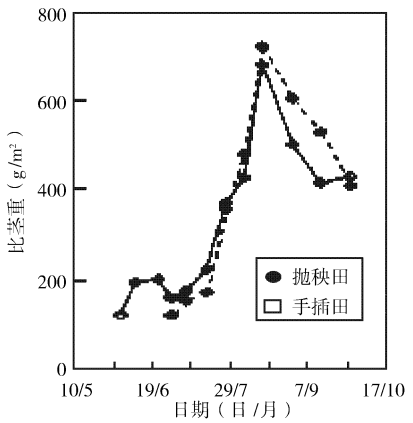

图 2 不同移栽方式比茎重对比

Fig. 2 Comparison of specific stem weight between HSTT and MT

图 3 表明,叶面积指数在秧田期由慢而快增长,在移栽期后,出现停滞甚至下降,立苗以后,叶面积指数近似呈 S 型曲线变化,达极值后下降。图 4 表明,不同移栽方式对叶面积发展影响很大。籼稻抛秧绿叶面积指数高达 10.5,而手插仅为 6.8 左右。绿茎面积指数则无区别,总叶面积指数抛秧田高 35 %。

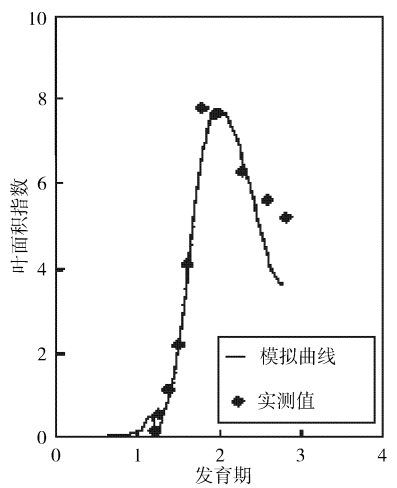

图 3 叶面积指数模拟结果显示

Fig. 3 Model output for leaf area index

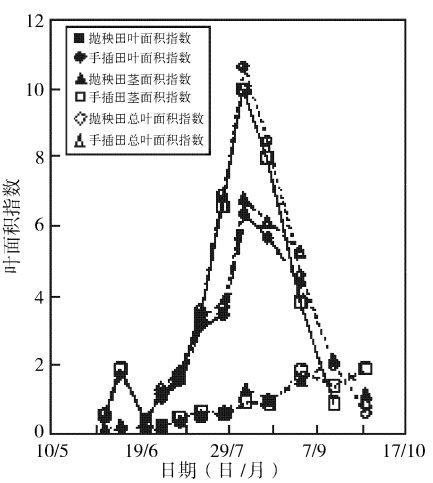

图 4 不同移栽方式叶面积发展对比

Fig. 4 Comparison of leaf area development between HSTT and MT

2.3 光合作用子模型

冠层光合作用是作物整个生命活动的基础, 它可由单叶光合作用、叶片辐射吸收、光在冠层中的分布 3 部分构成。

Spitter[10]从高斯积分方法发展冠层日同化量的简便计算方法: 先从空间步长(叶面积指数 LAI)选取冠层的 3 个高斯积分点(冠层顶部向下作叶面积密度积分, 分别达 0.112 7 LAI, 0.5 LAI, 0.887 3 LAI 的 3 个点), 对其光合作用瞬时值作加权平均(权重系数分别为 0.277 778, 0.444 444, 0.277 778), 得到冠层总的瞬时光合量; 再从时间步长(日出—日落, 单位为 h)取 3 个高斯积分点: 1) (0.5− $\sqrt{0.15}$) ×时间步长; 2) 0.5×时间步长; 3) (0.5+ $\sqrt{0.15}$) ×时间步长), 对冠层光合作用瞬时值作加权平均, 乘以日长即得冠层日总光合量。

2.3.1 单叶光合作用

单叶光合作用与光强的关系表达式为

$$A_L = A_M(1 - e^{-\epsilon I_a / A_M})。 \tag{6}$$

式中, A_L 为单叶光合速率($molCO_2 m^{-2} s^{-1}$); A_M 为单叶最大可能光合速率; ϵ 为初始光能利用率($\mu molCO_2/\mu mol$); I_a 为单叶吸收的光强($\mu mol m^{-2} s^{-1}$)。ϵ 描述了生物物理学过程的特性, 品种间无差异, 其值随温度升高而线性下降。A_M 变化较大, 是叶片角度、环境实际状况、植物品种、温度、叶片 N 含量的函数。通常用抛物线型影响函数描述温度对单叶光合作用的影响

$$A_L = A_M(1 - e^{-\epsilon I_a / A_M})(1 - a(T - T_0)^2)。 \tag{7}$$

其中, a 为参数, T 为日均温, T_0 为光合作用最适温度, 待定参数。

2.3.2 叶片辐射吸收

叶片辐射吸收量决定光合作用的强弱。叶片只吸收光合有效辐射, 其值约为总辐射的一半。某一时刻冠层有效辐射吸收量(PAR)随太阳高度角的变化而变化。

$$PAR = 0.5 \times \Phi \times \sin\beta \times (1 + 0.4\sin\beta) / d\sin(be)。 \tag{8}$$

$$d\sin(be) = 3\,600 \times (D \times (\sin\varphi\sin\delta + 0.4 \times (\sin^2\varphi\sin^2\delta + \cos^2\varphi\cos^2\delta \times 0.5)) + 12.0 \times \cos\varphi\cos\delta(2.0 + 3.0 \times 0.4 \times \sin\varphi\sin\delta) \times \sqrt{1 - \mathrm{tg}\varphi\mathrm{g}\delta/\pi})。 \tag{9}$$

式中, Φ 为太阳辐射日总量; β 为太阳高度; $(1 + 0.4\sin\beta)/d\sin(be)$ 为大气输送修正因子; D 为日长; φ 为测点纬度; δ 为太阳赤纬。

以大气透明度为依据, PAR 分为直接辐射(入射角等于太阳高度角)和漫射辐射(入射角为各个方向), 它们有不同的消光系数, 在冠层中的分布也不同。叶片分为遮荫叶片和光照叶片, 光照叶片的比率为到达该层的直接辐射占总辐射的百分比。遮荫叶片只吸收漫射辐射, 光照叶片同时吸收直接辐射和漫射辐射。

2.3.3 光在冠层中的分布

冠层对光的作用可分为吸收、反射、透射 3 部分。单个叶片对光合有效辐射的散射率(scp)为 0.2, 即到达叶片的光合有效辐射的 20 % 被透射或反射。冠层对漫射辐射的反射率为 $refh = (1 - \sqrt{1 - scp})/(1 + \sqrt{1 - scp})$, 对直接辐射的反射率为 $refs = refh \times 2/(1 + 2\sin\beta)$。直接辐射到达叶片后, 被叶片透射、反射, 产生次生漫射辐射, 因此把它分为漫射部分和直射部分, 直射部分消光系数为 $kb1 = 0.5/\sin\beta$。漫射辐射的消光系数(kdf)为一常数。直接辐射消光系数为 $kdrt = kb1 \times \sqrt{1 - scp}$。从而光在冠层中的分布可见下式

$$\left.\begin{aligned} visdf &= (1 - refh) \times pardf \times kdf \times e^{(-kdf \times LAI_C)}, \\ vist &= (1 - refs) \times pardr \times kdrt \times e^{(-kdrt \times LAI_C)}, \\ visd &= (1 - scp) \times pardr \times kbl \times e^{(-kbl \times LAI_C)}。 \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

其中, LAI_C 为某层叶面积指数; $visdf$ 为到达 LAI_C 深度的光合有效漫射辐射; $vist$ 为到达 LAI_C 深度的光合有效直接辐射; $visd$ 为到达 LAI_C 深度的光合有效漫射辐射的直射部分; $pardf$ 为冠层上方的光合有效漫射辐射; $pardr$ 为冠层上方的光合有效直接辐射。

在某一冠层深度, 根据单位叶面积光照叶片和遮荫叶片各自所吸收的光强可分别计算它们的瞬时 CO_2 同化速率, 冠层中某一深度单位叶面积瞬时 CO_2 同化速率实际值是两者根据光照叶面积和遮荫叶面积比例的加权平均。某时刻冠层 CO_2 同化速率是该时刻 3 个冠层深度的单位叶面积 CO_2 同化速率按高斯权重加权平均, 乘以群体叶面积指数即得该时刻冠层总的 CO_2 同化速率。同理, 对于 1 d 中选取的 3 个时刻点, 根据已计算得到 3 个时刻的冠层 CO_2 同化速率加权平均可获得冠层 CO_2 同化速率时间平均值, 乘以日长就等于冠层日总 CO_2 同化量。

2.4 呼吸作用

呼吸作用是决定植物生产水平的另一主要生理过程。光合作用所固定的碳里面有一部分为器官的生理作用提供能量, 称维持呼吸。其余部分用于合成体内的结构干物质, 合成过程中能量的损失用生长呼吸来表示。两者共同构成总的呼吸消耗。

2.4.1 维持呼吸

维持呼吸主要用于维持有机体的生化和生理结构。在作物生长模拟中, 只考虑细胞水平的维持呼吸, 可分为 3 部分: 生物膜两侧浓度差的维持, 蛋白质的维持, 与代谢强度有关的组成部分的维持。维持呼吸与所需维持的植物干重呈正比。最重要的环境影响因子为温度, 温度每升高 10 ℃, 维持呼吸速率增加 1 倍。标准温度(25 ℃) 下的维持呼吸系数随生育期变化而变化。实际温度下的维持呼吸率为

$$R_M = R_{mr} \times Q_{10}^{(T-25)} \times w 。 \quad (11)$$

式中, R_{mr} 为标准温度(25 ℃) 下的维持呼吸系数; Q_{10} 为呼吸作用增温系数, 取 2.0; w 为需维持的群体干物重, T 为日平均温度。

2.4.2 生长呼吸

生长呼吸过程是初始光合产物通过生物化学过程转化为结构干物质的过程, 转化的效率取决于所形成的干物质的成份。生长呼吸率即转化过程中能量的损耗率, 这种消耗可包含在由葡萄糖合成各类植株干物质的转换系数中。生长呼吸依赖于植物的光合效率, 对温度不敏感。

$$R_G = A_L \times R_{gr}。 \quad (12)$$

式中, R_G 为生长呼吸率; R_{gr} 为生长呼吸系数。

2.5 光合作用参数确定

在试验中, 我们用美国产净光合仪测得了在一定温度、光强、CO_2 条件下得单位叶面积净光合作用瞬时值($photo$) 。由于逐日 CO_2 浓度不可能获得, 且实际变化不大, 可作为常量。据(13) 式, 以 64 组净光合作用值、群体干物重、光强、温度为输入因子, 用 Levenbeg-Marquardt 方法来确定 ϵ、A_M、a、T_0、R_{gr}、R_{mr} 等参数。初始光能利用率(ϵ) 为 0.10($\mu molCO_2/\mu mol$) ; 单叶最大可能光合率(A_M) 为 22.51($\mu molCO_2 m^{-2} s^{-1}$) ; 温度参数(a) 为 0.001; 光合作用适温(T_0) 为 28 ℃; 生长呼吸系数(R_{gr}) 为 0.3; 维持呼吸系数(R_{mr}) 为 0.011。

$$photo = A_L - (R_M + R_G) = A_L - R_{mr} Q_{10}^{(T-25)/10} \times w - A_L \times R_{gr}$$
$$= A_M(1 - e^{\epsilon_a / A_M}) \times (1 - a(T - 10)^2) \times (1 - R_{gr}) - R_{mr} \times Q_{10}^{(1-25)/10} \times w 。 \quad (13)$$

2.6 干物质分配与器官生长

总干物重的动态递推模型为 $w(t) = w(t-1) + \Delta w$。式中, $w(t)$ 为第 t 天的干物重;

$w(t-1)$ 为第$(t-1)$天的干物重; Δw 为干物重日增量。根据初始时刻群体干物重, 用此式可求算仍 1 天的群体总干重。

植株的光合作用产物, 根据植株生长的要求, 按一定的比例分配到根、茎、叶和穗中。目前对光合产物分配的内在控制机理尚不十分清楚, 现有的理论认为: 在生长初期(营养生长阶段)光合产物全部分配给根、茎、叶; 过渡时期(营养生长和生殖生长并行阶段), 部分同化物开始流向穗部; 生长后期(生殖生长阶段)则全部分配给穗, 此外, 还将早期储存在茎、叶中的可塑性物质转移到穗粒中。分配系数定义个某个器官干重增量与植株总干重增量比值, 转移系数为器官干重增量(负值)与该器官已有干重的比值(14 式)。它们随发育阶段的变化见表 3、图 5。

$$\left.\begin{aligned}
&w_j^i = w_j^{i-1} + f_j \times \Delta w - \beta_j \times w_j (j = 1, 2),\\
&w_3^i = w_3^{i-1} + f_3 \times \Delta w,\\
&w_4^i = w_4^{i-1} + f_4 \times \Delta w + \sum_{j=1}^{2} \beta_j w_j,\\
&f_j = \Delta w_j / \Delta w, \sum_{j=1}^{4} f_j = 1, f_j \geq 0 (j = 1 \sim 4),\\
&\beta_j = \Delta w_j / w_j (j = 1, 2)。
\end{aligned}\right\} \quad (14)$$

其中, i、$i-1$ 为第 i、$i-1$ 天; w 为 $i-1$ 到 i 阶段内植株的干物重增量; β 为叶、茎的转移系数$(j = 1, 2)$; w_j 为各器官的干物重; f_j 各器官的分配系数$(j = 1 \sim 4)$。另外, 须考虑作物的自然衰老问题。经分析, 黄叶在发育阶段为 1.5 时开始发生, 它占植株总干重的比例($rate$)随发育阶段而增加符合抛物线函数(15 式)。

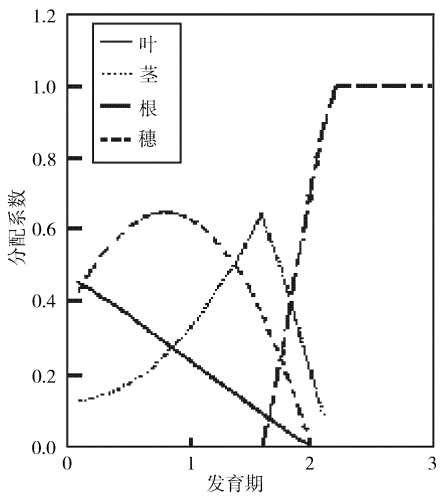

图 5　分配系数随发育期的变化

Fig. 5　Changes of allocation coefficient with phenological stage

$$rate = -0.321\,1 + 0.279\,2DVS - 0.042\,8DVS^2$$
$$(DVS > 1.5, n = 22, \zeta = 0.91)。 \quad (15)$$

表 **3**　分配系数、转移系数随发育期的变化

Table 3　Changes of allocation and transfer coefficients with phenological stage

	方　　程	发育阶段	样本数	相关系数
叶分配系数	$0.370\,0 + 0.275\,4DVS - 0.230\,2DVS^2$	0～2	38	0.7***
茎分配系数	$0.207DVS^2 + 0.130$	0～1.6	31	0.82*
茎分配系数	$1.853 - 1.158DVS$	1.6～2.2	18	0.89***
根分配系数	$0.470 - 0.235DVS$	0～2	51	0.85***
穗分配系数	$3.125DVS - 5.781,1$	1.85～2.2	22	0.91***
叶转移系数	$1.435\,3 - 0.830\,0DVS + 0.150\,8DVS^2$	> 2	13	0.95***
茎转移系数	$0.397\,7LN(DVS) - 0.169\,2$	> 2.2	11	0.92***

注: * * * 通过0.001 显著性检验

3 结果与讨论

图 6 表明, 根、茎、叶干重随发育进程先后经历指数增长、线性增长、缓慢增长 3 个阶段。根干重在 *DVS* 为 2.0 左右以后趋向于稳定, 其干物质基本上没有向穗部转移。茎、叶干重在 *DVS* 为 2.3 左右时开始下降, 发育阶段为 2.3 时, 正是抽穗期后, 即表明茎、叶干物质在抽穗后向穗部转移; 由于衰老和物质转移, 绿叶干重在 *DVS* 为 2.9 左右降至为零, 绿茎干重在 *DVS* 为 3.0 左右降至为零。穗干重在 *DVS* 为1.9 (孕穗期) 时开始一直上升, *DVS* 为 3.0 时达到成熟期干重。各器官干物重的变化是符合生物学规律的。最终经济产量模拟值为 7 537.5 kg/hm^2, 实际值为 7250.3 kg/hm^2, 模拟误差为 4 %。

抛秧稻叶面积指数增大, 抽穗前能容纳较多的生物量, 抽穗后干物质从茎、叶向穗部的转移较彻底是抛秧稻能够增产的重要原因。

进一步的工作可以在群体消光系数的研究、物质分配与转移方面的比较分析等方面展开。

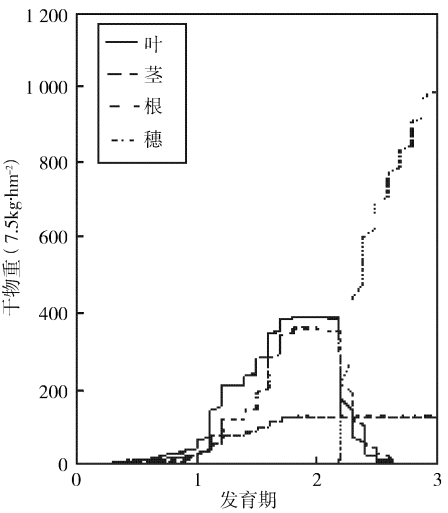

图 6 器官干物重(7.5 kg/hm^2)模拟曲线

Fig.6 Modelled dry matter of organ (7.5 kg/hm^2)

参考文献

[1] 殷新佑. 水稻发育温度效应的非线性模型及应用[J]. 作物学报, 1994, 20(6): 692～700

[2] YIN Xinyou. A nonlinear phenological model for predicting the growth durations in rice[J]. Acta Agriculturac Universities Jiangxiensis, 1992, 14(3): 224～229

[3] KROPFF. ORYZA! Abasic model for irrigated lowland rice production IRRI[R], 1993

[4] 岸田恭允. 自然日长下的曙暮期照度[J] . 国外农学——农业气象, 1988, 9(4): 12～14

[5] 高亮之. 中国不同类型水稻生育期的气象生态模式及应用[J]. 农业气象, 1982, 3(2): 1～8

[6] 中国农业百科全书编辑委员会. 中国农业百科全书——农业气象卷[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 56～112

[7] PRESS W H. C 语言数值模拟算法大全[M]. 傅祖芸译. 北京: 电子工业出版社, 1995. 79～136

[8] 于 强. 包含生态因子的广义 Logistic 模型[J]. 生态学报, 1996, 16(3): 289～294

[9] HORIE, NAKAGAWA H. Modelling and prediction of development process in rice. 1. Structure and method of parameter estimation of a model for simulating developmental process toward heading[J]. Japan J Crop Sci, 1990, 50(4): 687～695

[10] SPITTERS C J T. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis-part two calculation of canopy photosynthesis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, (38): 231～242

A DYNAMIC MODEL FOR DRY-LAND-SEEDING AND THROWING TRANSPLANTING (HSTT) RICE

LI Xiang-ge, HE Hai-yan, JING Yuan-shu, GU Xian-yue
(Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: In the content of multiple planting experimental data, a dynamic model for HSTP rice is developed, including leaf area development, photosynthesis, respiration, dry matter accumulation and allocation sub-models. Much investigation is made on the relationship between I_{LA} and temperature, simplified calculation for photosynthesis, estimation of net assimilation and variation of dry matter allocation coefficient with phenological stage. In comparison with traditional manual-transplanting (MT) rice, the reason why HSTT rice could reach high yield is revealed in combination with meteorological influence.

Keywords: dry-land-seeding and throw-transplanting; growth and development; dynamic model