

基于 Logistic 曲线的作物累积蒸发蒸腾量模拟研究

徐俊增^{1,2}, 彭世彰^{1,3}, 李道西^{1,3}, 叶澜涛^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学农业工程学院, 江苏 南京 210098 3. 河海大学节水研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 为了探讨作物全生育期内累积蒸发蒸腾量的变化规律,采用 Logistic 曲线建立了夏玉米、设施栽培番茄和西瓜的累积蒸发蒸腾量随生育时间变化的模拟模型,并通过 Logistic 曲线的不同阶段分析了作物生育期内的需水规律.结果表明:玉米、番茄和西瓜的全生育期累积蒸发蒸腾量呈现出符合 Logistic 曲线的‘慢—快—慢’的变化规律,采用 Logistic 曲线模拟大田和设施栽培作物累积蒸发蒸腾量是可行的;与 FAO 推荐的生育进程划分结果相比,根据 Logistic 曲线对大田作物玉米的生育进程划分结果相差不大,而设施栽培番茄和西瓜的生育进程划分结果有较大的差异.

关键词 累积蒸发蒸腾量;Logistic 曲线;模拟

中图分类号 S161.4 S274 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2007)02-0225-04

作物需水规律的研究是制订灌溉制度、制定地区和流域水利规划、灌排工程规划设计与管理的基础.关于作物需水规律已经就不同作物根据其生育期内的变化规律、影响因素及其估算方法开展了大量的研究.研究表明,作物的蒸发蒸腾量(crop evapotranspiration,简称 ET_c)受到作物因素、气候因素和土壤因素的共同影响,随着作物生长发育表现出一定的同步性^[1-5].依据农田生态系统动力学和生物学原理,在一定环境中,生物生长的结果都趋近一个期望的顶极,无论生物个体和群体的增长,还是环境因素的变化都遵从 Logistic 曲线(也称为 S 型渐进增长曲线)的变化规律^[6-8].由作物因素、气候因素和土壤因素共同决定的作物蒸发蒸腾量累积变化同样也会表现出符合 Logistic 曲线的变化规律.因此本文从作物生长发育的角度,基于现场试验获得的作物蒸发蒸腾量资料,建立生育期内累积蒸发蒸腾量的 Logistic 曲线模拟,并通过对 Logistic 曲线不同阶段的分析,揭示作物生育期内的需水规律,为作物生育期内的水分优化管理提供依据.

1 研究方法 with 原理

Logistic 曲线 1838 年由比利时数学兼生物学家 Verhulst 首先提出,美国生物学家、人口统计学家 Pearl 应用它对生物繁殖和生长过程进行了大量研究^[6].此后 Logistic 曲线被应用于植物生长过程包括干物质生长、叶面积动态、作物群体生长动态等方面的模拟研究^[7-10]及对社会经济学现象的解释中^[11].

$$y = \frac{K}{1 + ae^{-bt}} \tag{1}$$

式中:K——增长极限,表征系统变化的顶值;a——截距系数,表征基础状态参数;b——增长率系数,表征系统状态趋近顶极的速度.

如图 1 所示,根据曲线 2 阶导数和 3 阶导数的 3 个零点可以将系统划分为起步期、成长期、成熟期和衰退期 4 个阶段.通过这 4 个阶段的划分,可以将作物累积蒸发蒸腾量的变化规律与作物生长发育阶段相对应.

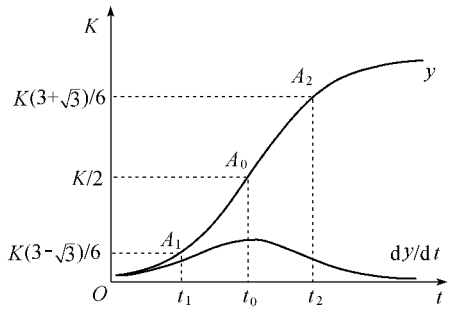


图 1 Logistic 曲线及其阶段划分示意图
Fig.1 Schematic diagram of Logistic curve and its stage division

起步期为作物移栽或出苗后的初步生长阶段,此时作物基础生物量较小,叶面积较小,蒸发蒸腾量增长

缓慢,进入成长期以后,植物生长逐步旺盛,生物量与叶面积迅速增大,蒸发蒸腾量增长呈现加速增长的趋势;进入成熟期后,作物由营养生长转向生殖生长,叶片的活性逐渐降低,植株蒸发蒸腾量的增长速度呈现下降趋势;进入衰退期后,植株底部叶片逐步死亡,植物蒸发蒸腾量呈现缓慢增加的趋势。

2 作物需水规律的 Logistic 曲线模拟

根据 1997~2000 年山西霍泉、河南新乡夏玉米(6~9 月)全生育期的需水规律,2001 年江苏南通的设施大棚番茄(3~6 月)和西瓜(4~6 月)全生育期需水规律(图 2),分别建立大田和设施栽培作物全生育期累积蒸发蒸腾量的 Logistic 曲线模拟。

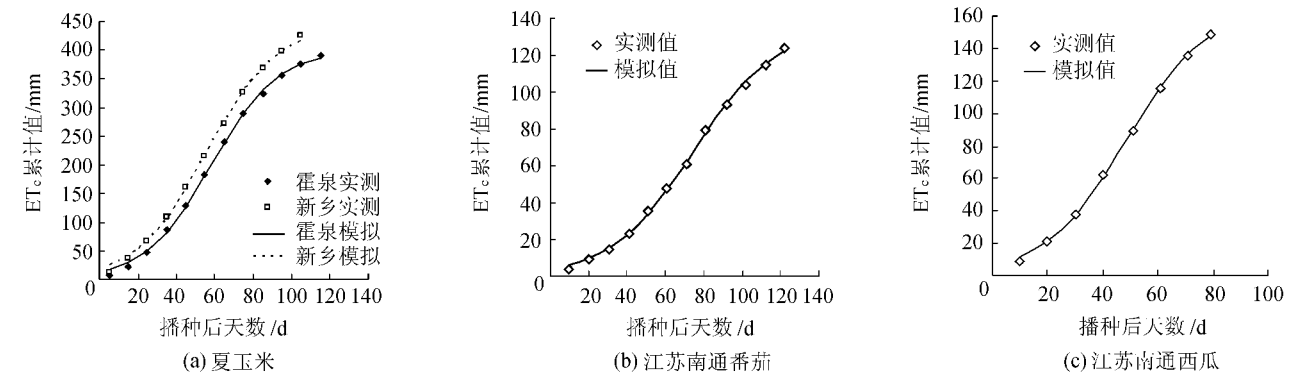


图 2 作物累积蒸发蒸腾量及其模拟

Fig.2 Crop accumulative evapotranspiration and its simulation by Logistic curve

如图 2 所示(图中夏玉米资料来自国家科技攻关项目 96-006-02-02 专题成果),玉米、番茄和西瓜的全生育期累积蒸发蒸腾量呈现出 Logistic 曲线的“慢—快—慢”的变化规律.分别采用移栽天数(番茄)和播种后天数(夏玉米和西瓜)建立作物累积蒸发蒸腾量的 Logistic 模拟,模拟模型各参数结果见表 1.

按照式(2)计算 Nash-Sutcliffe 模型有效性指数 $E^{[11-12]}$.

表 1 作物累积蒸发蒸腾量的 Logistic 模拟结果

Table 1 Simulated result of crop accumulative evapotranspiration by Logistic curve

作物	数据采集地	模拟模型	有效性指数 E	F
夏玉米	山西霍泉	$y = 400.36 / (1 + 30.065e^{-0.0583t})$	0.998 9	4 172.4 ***
	河南新乡	$y = 442.33 / (1 + 22.980e^{-0.0559t})$	0.998 8	3 369.0 ***
设施番茄	江苏南通	$y = 135.328 / (1 + 32.987e^{-0.0468t})$	0.998 9	4 179.65 ***
设施西瓜	江苏南通	$y = 166.168 / (1 + 26.415e^{-0.0675t})$	0.999 3	3 625.6 ***

注:*** 在 0.001 水平模型模拟关系显著.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$$

(2)

式中 o_i 和 p_i 分别表示 ET_c 的实测值和模拟值.

从模拟结果来看(表 1),模型有效性指数均在 0.99 以上,具有较高的有效性,模型 F 检验显示在 0.001 显著性水平,模型模拟关系显著.因此,认为采用 Logistic 曲线模拟大田和设施栽培作物累积蒸发蒸腾量是可行的.

3 基于 Logistic 曲线的作物生育阶段划分

根据 Logistic 曲线的阶段划分理论,分别对夏玉米、设施栽培番茄和西瓜的生育期进行阶段划分(结果见表 2),并与 FAO(联合国粮农组织)推荐的按照初期(Initial)、发育期(Development)、中期(Middy)和后期(Later)划分的结果(按照表 2 中生育天数相近的原则从 FAO 资料中选择)进行比较.

从划分结果来看,山西霍泉和河南新乡夏玉米起步期、成长期、成熟期和衰退期 4 个阶段的生育天数分别为 36 d 和 33 d,23 d 和 24 d,23 d 和 23 d 以及 33 d 和 25 d,全生育期为 115 d 和 105 d.两地夏玉米前 3 个阶段

的生育天数比较接近,只有衰退期差别比较大(8 d).与 FAO 推荐的美国 Idaho 地区夏玉米(4 月播种,全生育期110 d)生育进程划分相比,霍泉(新乡)各生育阶段的天数分别相差 6 d(3 d),- 7 d(- 6 d),- 7 d(- 7 d)和 13 d(5 d).

表 2 基于 Logistic 曲线的作物生育进程划分结果

Table 2 Division of crop growth period by Logistic curve and its comparison with result recommended by FAO

作物	数据采集地	起步期/d	成长期/d	成熟期/d	衰退期/d	全生育期/d
夏玉米	山西霍泉	0 ~ 36	37 ~ 59	60 ~ 82	83 ~ 115	115
	河南新乡	0 ~ 33	34 ~ 57	58 ~ 80	81 ~ 105	105
	FAO(Idaho, USA) [13]	0 ~ 30	31 ~ 60	61 ~ 90	91 ~ 110	110
番茄	江苏南通(设施)	0 ~ 47	48 ~ 74	75 ~ 103	104 ~ 122	122
	FAO(Mediterranean) [13]	0 ~ 30	31 ~ 70	71 ~ 115	116 ~ 145	145
西瓜	江苏南通(设施)	0 ~ 29	30 ~ 48	49 ~ 68	69 ~ 79	79
	FAO(Near East) [13]	0 ~ 10	11 ~ 30	31 ~ 50	51 ~ 80	80

注 横线两侧分别为起始和结束的日期,阶段划分中数字为移栽(播种)后天数,FAO 推荐结果为露天栽培的结果.

设施栽培番茄全生育期天数与 FAO 推荐相差比较大,相差达 23 d. 4 个阶段生长天数划分结果分别为 47 d,27 d,29 d 和 19 d,全生育期 122 d,与 FAO 推荐的地中海地区(Mediterranean)番茄(4 ~ 5 月种植,全生育期 145 d,露天生长)生育进程划分结果分别相差 17 d,- 13 d,- 16 d 和 - 11 d. 分析其原因在于播期和栽培条件的变化. 本文试验设施栽培番茄 2 月 28 日移栽,比 FAO 推荐的时间提前了 1 ~ 2 个月. 该阶段温度较低,作物生长较缓慢,因此,起步期比 FAO 推荐的延长了 17 d. 此后设施栽培的覆盖条件可以更好地利用光热资源,番茄生长加快. 后 3 个阶段分别比 FAO 推荐的缩短了 13 d,16 d 和 11 d.

设施栽培西瓜的 4 个阶段划分结果分别为 29 d,19 d,20 d 和 11 d,,全生育期 79 d. 选择 FAO 推荐的总生育天数与南通试验结果比较接近的近东(Near East,也译作东南欧)地区的西瓜(3 月或 8 月种植,全生育期 80 d,露天生长)阶段划分进行比较,可以发现设施栽培西瓜的 4 个阶段分别相差 19 d,- 1 d,0 d 和 - 19 d. 成长期与成熟期 2 个划分结果比较接近,但起步期和衰退期 2 个阶段相差比较大. 这与设施栽培在作物生长前期温度较低而后期光热资源充足有关.

与 FAO 推荐的生育进程划分相比,采用 Logistic 曲线的阶段划分对玉米影响不大,而对设施栽培番茄和西瓜的影响较大.

4 结 论

根据实测的夏玉米,设施栽培番茄、西瓜的蒸发蒸腾量资料,采用广泛应用于生物生长过程描述的 Logistic 曲线,建立了基于 Logistic 曲线的作物累积蒸发蒸腾量的模拟模型,并通过对 Logistic 模拟模型的分析对作物生育期按起步期、成长期、成熟期和衰退期 4 个阶段进行了划分.

结果表明 玉米、番茄和西瓜的全生育期累积蒸发蒸腾量呈现出符合 Logistic 曲线的‘慢—快—慢’的变化规律,采用 Logistic 曲线模拟大田和设施栽培作物累积蒸发蒸腾量是可行的;与 FAO 推荐的生育进程划分结果相比,根据 Logistic 曲线对大田作物玉米的生育进程划分结果相差不大,而对于设施栽培番茄和西瓜的生育进程划分结果有较大的差异.

参考文献：

[1] 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: 35-68.

[2] 康绍忠,蔡焕杰. 农业水管理学[M]. 北京: 中国农业出版社,1996: 101-103.

[3] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等. 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2006, 34(3): 239-242.

[4] 彭世彰,李荣超. 覆膜旱作水稻蒸发蒸腾量计算模型研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2001,29(3): 51-54.

[5] 俞双恩,张展羽. 江苏省水稻高产节水灌溉技术体系研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版,2002,30(6): 30-34.

[6] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理,2005,24(1): 112-115.

[7] 彭世彰,李荣超,朱成立. 节水灌溉的水稻干物质增长模型研究[J]. 水利学报,2002(11): 99-102.

[8] 殷淑燕,刘玉成. 大头茶构件种群生物量及叶面积动态[J]. 植物生态学报,1997,21(1): 83-89.

- [9] 常学向,赵文智,赵爱芬.黑河中游二白杨叶面积指数动态变化及其与耗水量的关系[J].冰川冻土,2006,28(1):85-90.
- [10] 杨建堂,王文亮,霍晓婷,等.烤烟地上部干物质增长过程与有效积温关系研究[J].河南农业大学学报,2004,38(1):28-32.
- [11] KUMAR M,RAGHUWANSHI N S,SIONGH R,et al. Estimating evapotranspiration using artificial neural network[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 2002, 128(4): 224-233.
- [12] KRAUSE P, BOYLE D P, BASE F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Advances in Geosciences, 2005, 5: 89-97.
- [13] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 97-116.

Simulation of crop accumulative evapotranspiration based on Logistic curve

XU Jun-zeng^{1,2}, PENG Shi-zhang^{1,3}, LI Dao-xi^{1,3}, YE Lan-tao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. College of Modern Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

3. Institute of Water-Saving Irrigation, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A simulation model of crop accumulative evapotranspiration varying during the full growth period was established for field cultivation of summer maize and protective cultivation of tomato and watermelon by use of the Logistic curve, and the regularities of water demand by crops were analyzed by means of different stages of the Logistic curve. The result shows that the accumulative evapotranspiration of summer maize, tomato, and watermelon during the growth period is in conformity with the Logistic curve with the rhythm of “slow-quick-slow”, therefore it is feasible for the Logistic curve to simulate the crop accumulative evapotranspiration in field cultivation and protective cultivation. As compared with the result recommended by FAO, the result of growth period division for field cultivation of summer maize is of a little difference, but those for protective cultivation of tomato and watermelon are of great difference.

Key words: accumulative evapotranspiration ; Logistic curve ; simulation