

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.05.006

分蘖期水分调控对覆膜旱作水稻茎蘖动态影响分析

徐俊增^{1,2}, 彭世彰^{1,2}, 魏 征^{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. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:通过分蘖期不同水分调控试验,研究了分蘖期土壤水分调控对覆膜旱作水稻茎蘖动态变化规律的影响,采用套接的 Logistic 曲线建立了不同水分调控条件下水稻茎蘖动态模拟模型.在此基础上,分析了水稻茎蘖动态模拟模型参数的变化以及覆膜旱作水稻茎蘖的动态特性.结果表明:覆膜旱作节水灌溉水稻的茎蘖动态发生新的变化,分蘖前期茎蘖增长缓于浅湿灌溉处理,达到分蘖高峰期时间推迟,时间滞后 10~20 d.土壤水分控制越低,最高茎蘖量越低,但水分最低(处理 3)条件下,由于补偿效应的存在,取得了较高的茎蘖量,茎蘖高峰出现时间延迟较多.采用套接的 Logistic 曲线能够很好地模拟不同水分调控条件下的水稻茎蘖动态变化规律,模拟结果显示,土壤水分控制条件下水稻茎蘖动态具有增长受限、增长过程提前、茎蘖消亡减小、消亡高峰延迟的特点.

关键词:水稻 茎蘖动态 水分调控 套接 Logistic 曲线
中图分类号: S276 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)05-0511-05

群体动态的变化、合理消长以及合理群体的构建是实现水稻、小麦等群生作物水资源高效利用的基础^[1-2].分蘖期是水稻开始分蘖至达到最大分蘖数的时段,分蘖期的土壤水分调控对水稻分蘖规律产生重要影响^[3-4].覆膜旱作特有的水分与田间管理导致土壤水肥气热条件的改变,会对合理群体的构建产生较大影响^[5-8].因此本文以覆膜旱作的水稻为研究对象,分析分蘖期不同水分调控条件下,茎蘖动态的变化规律及其对土壤水分调控的响应,并建立茎蘖动态模拟模型,为覆膜旱作水稻合理的水分调控提供资料.

1 试验设计与观测

1.1 试验处理

试验于 1999 年在安徽天长二峰电灌总站试验场(北纬 32.6°,东经 119.1°)开展.试验区土壤为黏壤土,0~40 cm 土层的密度为 1.43 g/cm³,饱和含水率 45.5%,田间持水率 39.2%(体积含水率).供试水稻品种为“汕优 63 号”,育秧方式为旱育秧.5 月 30 日移栽,9 月 25 日收获.水稻生长期平均温度 24.5℃,E601 蒸发量为 436.9 mm,降雨量 484.8 mm.水稻移栽密度 15×10⁵ 穴/hm²,每穴 1 苗.该田期施肥量纯 N 180 kg/hm²,P₂O₅ 90 kg/hm²,K₂O 82.5 kg/hm².在施肥、密度相同的情况下,进行土壤水分适宜下限试验.

考虑水稻在分蘖前期和分蘖后期对水分亏缺敏感程度不同,借鉴已有成果,在分蘖前期、分蘖后期设定如表 1 所示的 3 种土壤水分控制下限^[7],其他生育阶段保持相同的水分控制下限.以浅湿灌溉作为对照处理.浅湿灌溉方式为:分蘖前期,0~40 mm 水层;分蘖后期,晒田拔孕—抽开期,20~60 mm 水层;乳熟期,0~40 mm 水层.本次

表 1 覆膜旱作水稻分蘖期土壤水分控制下限
Table 1 Lower limits for rice cultivated in plastic film mulched dryland irrigation during tillering period

处理方式	灌水下限(占田间持水率的百分比)/%			
	分蘖前期	分蘖后期	拔孕—抽开	乳熟期
处理 1	80	70	80	80
处理 2	70	60	80	80
处理 3	60	50	80	80

注 根层土壤控制深度为:分蘖前期 0~15 cm;分蘖后期 0~20 cm;拔孕—抽开期 0~30 cm;乳熟期 0~40 cm.

试验共计4个处理,每个处理3次重复,共12个试验小区,安排在1.0 m×1.0 m×1.5 m有底测坑内.各处理在土壤水分达到控制下限之前不灌水,当达到下限时要及时灌水.

1.2 观测指标与观测方法

采用TDR时域反射仪定点定位测定土壤含水量,测量深度为0~20 cm,20~40 cm,一般每隔5 d测1次,灌水、降雨前后加测.在每个处理每5 d定点观测每丛茎蘖增减动态,在临近分蘖高峰期到抽穗期间每隔2~3 d观测1次.

2 水稻茎蘖动态变化规律的分析

水稻茎蘖动态变化规律是由新生分蘖的产生和无效分蘖的消亡过程共同作用形成的.分析不同灌溉模式下水稻茎蘖的动态变化规律(表2)可以发现,不同灌溉条件下水稻茎蘖的动态变化规律是一致的,均表现出随生育期延续先迅速增大、后逐渐减小的变化规律.

采用覆膜旱作节水灌溉模式,控制根系层土壤水分后,水稻的茎蘖动态发生新的变化.分蘖前期茎蘖增长缓于浅湿灌溉处理,达到分蘖高峰期时间推迟,时间滞后10~20 d.处理1,2,3最高茎蘖量分别为 418.8×10^5 株/hm²、 334.8×10^5 株/hm²和 451.4×10^5 株/hm²,分别比对照处理降低4.3%,23.5%和-3.1%,出现在移栽后的第49天、58天和58天,比常规灌溉的推迟了10 d,20 d和20 d.同时,覆膜旱作水稻茎蘖消退量较少,削峰平缓.各处理成穗数分别为 281.3×10^5 穗/hm²、 226.7×10^5 穗/hm²和 318.9×10^5 穗/hm²,与对照处理的 274.7×10^5 穗/hm²相比,分别增加了2.4%,-17.4%和16.1%.处理1,2,3覆膜旱作水稻有效分蘖率分别为65.9%,66.2%和69.6%,高于对照处理的61.4%.

分蘖期土壤水分是覆膜旱作水稻茎蘖消长过程的主要影响因素.分蘖前期和分蘖后期的土壤含水率分别为田间持水率的80%和70%时,最高茎蘖量 418.8×10^5 株/hm²,出现时刻比对照处理滞后10 d.当土壤含水率控制标准降低,分蘖前期和分蘖后期分别为田间持水率的70%和60%时,其最高茎蘖量降低为 334.8×10^5 株/hm²,峰值出现时刻进一步推迟,滞后对照处理达20 d.土壤含水率控制标准进一步降低,分别为田间持水率的60%和50%时,其最高茎蘖量反而增高并超过了对照处理,达 451.4×10^5 株/hm²,但峰值出现时刻的滞后性没有改变,依然滞后对照处理达20 d.水稻的“抗旱性”锻炼和对恶劣环境的适应性,在复水后出现了显著的补偿生长效应,茎蘖大量增长,最高茎蘖量高达 451.4×10^5 株/hm²,但分蘖高峰出现的时间晚于对照处理约20 d,会对最终产量的形成产生影响.

覆膜旱作水稻分蘖前期和分蘖后期土壤含水率分别在田间持水率的70%和60%以上范围时,土壤水分控制越低,最高茎蘖量越低.与之相对应的处理1成穗数略高于对照处理,而处理2的成穗数则大幅度降低.同时处理1和处理2的穗粒数和千粒质量均出现降低,表明覆膜旱作导致水稻形成更多的小穗,产量也随之降低.土壤含水率分别在田间持水率的60%和50%时,水稻产生补偿效应,取得较高茎蘖量,但茎蘖高峰出现时间延迟较多.与之相对应的处理3水稻的穗粒数进一步降低,成穗数、结实率大幅度增加,形成更多小穗的现象更加明显,虽然产量高于处理1和处理2,但考虑形成小穗与目前水稻优质高产栽培是矛盾的,因此在非干旱年并不建议采用(表3).

3 水稻茎蘖动态变化规律模拟

3.1 水稻茎蘖动态模拟模型的建立

不同灌溉模式下水稻茎蘖动态均呈现出S形增长与S形下降相结合的2阶段变化规律^[9-10],因此考虑

表2 水稻茎蘖动态观测结果

Table 2 Observed results of shoot dynamics of rice

移栽 天数/d	水稻茎蘖量/(10株·hm ⁻²)			
	处理1	处理2	处理3	对照处理
1	15.0	15.0	15.0	15.0
14	75.0	62.7	75.2	92.3
19	105.0	93.6	121.2	146.4
24	190.1	153.6	206.9	251.1
29	220.1	181.7	243.6	348.5
34	306.3	235.5	323.1	416.3
39	357.5	284.3	365.6	437.7*
44	407.6	303.5	407.3	418.7
49	418.8*	324.6	419.6	385.2
53	418.2	329.7	435.5	366.3
58	417.5	334.8*	451.4*	347.4
65	391.2	318.5	412.7	323.3
70	365.0	302.1	374.1	299.3
75	352.5	294.5	367.1	299.1
80	340.1	286.8	360.2	299.1
85	327.5	279.2	353.1	299.0
89	315.9	266.0	344.4	294.8
94	304.4	252.9	335.7	288.0
99	292.8	239.7	327.0	281.3
104	281.3	226.7	318.9	274.7

注:*表示全生育期水稻的最大茎蘖量.

采用 2 个 S 曲线套接的思路建立水稻茎蘖动态模拟模型. 本文采用应用最为广泛的 Logistic 曲线^[10-12],通过曲线的套接建立水稻茎蘖动态模拟模型,形式如下:

$$Y = Y_1 - Y_2 = \frac{K_1}{1 + a_1 e^{-b_1 t}} - \frac{K_2}{1 + a_2 e^{-b_2 t}}$$
式中: Y ——茎蘖量,株/hm²; t ——自变量,采用移栽后天数, d; $K_1, K_2, a_1, a_2, b_1, b_2$ ——待定参数. 从图 1 可以看出, K_1, K_2 为增长曲线 Y_1 与消亡曲线 Y_2 所能达到的最大值,即全生育期水稻茎蘖发生总量与茎蘖消亡总量, b_1, b_2 则反映了 Y_1 与 Y_2 曲线的曲率, a_1, a_2 与 Y_1 与 Y_2 曲线的初始状态有关.

3.2 模拟结果分析

根据实测的水稻茎蘖动态结果,以误差平方和最小为准则,通过优化算法确定水稻茎蘖动态模拟模型的参数,得到不同水分调控方案条件下水稻茎蘖动态模拟模型,结果如表 4 所示.

表 4 水稻茎蘖动态套接 Logistic 曲线模拟模型参数
Table 4 Parameters of nested Logistic curve for simulating shoot dynamics of rice

处理 方式	模型参数						模型统计参数		
	K_1	K_2	a_1	a_2	b_1	b_2	均方误差 (10 ⁵ 株·hm ⁻²)	R^2	F
处理 1	761.44	492.76	21.50	22.42	0.098 0	0.060 5	7.17	0.996 1	1 293.1
处理 2	681.55	483.49	11.71	9.55	0.082 0	0.045 5	5.37	0.996 5	2 226.9
处理 3	789.00	485.18	18.39	18.18	0.095 6	0.059 7	9.54	0.993 5	2 208.4
对照处理	870.38	583.66	40.37	49.70	0.140 2	0.103 2	5.78	0.996 9	1 271.7

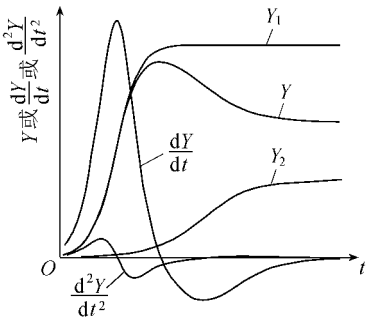


图 1 套接 Logistic 曲线

Fig. 1 Sketch of nested Logistic curve

表 3 不同灌溉处理水稻产量及其构成因素
Table 3 Rice yields and component factors under different irrigation treatment schemes

处理 方式	成穗数/ (10 ⁵ 穗·hm ⁻²)	穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	结实 率/%	千粒 质量/g	实际产量/ (kg·hm ⁻²)
处理 1	281.3	181.5	91.1	26.1	9 795
处理 2	226.7	184.7	84.0	26.8	8 880
处理 3	318.9	161.2	81.5	26.8	10 575
对照处理	274.7	204.4	90.6	27.9	11 025

b_1, b_2 则反映了 Y_1 与 Y_2 曲线的曲率, a_1, a_2 与 Y_1 与 Y_2 曲线的初始状态有关.

根据实测的水稻茎蘖动态结果,以误差平方和最小为准则,通过优化算法确定水稻茎蘖动态模拟模型的参数,得到不同水分调控方案条件下水稻茎蘖动态模拟模型,结果如表 4 所示.

表 4 水稻茎蘖动态套接 Logistic 曲线模拟模型参数
Table 4 Parameters of nested Logistic curve for simulating shoot dynamics of rice

处理 方式	模型参数						模型统计参数		
	K_1	K_2	a_1	a_2	b_1	b_2	均方误差 (10 ⁵ 株·hm ⁻²)	R^2	F
处理 1	761.44	492.76	21.50	22.42	0.098 0	0.060 5	7.17	0.996 1	1 293.1
处理 2	681.55	483.49	11.71	9.55	0.082 0	0.045 5	5.37	0.996 5	2 226.9
处理 3	789.00	485.18	18.39	18.18	0.095 6	0.059 7	9.54	0.993 5	2 208.4
对照处理	870.38	583.66	40.37	49.70	0.140 2	0.103 2	5.78	0.996 9	1 271.7

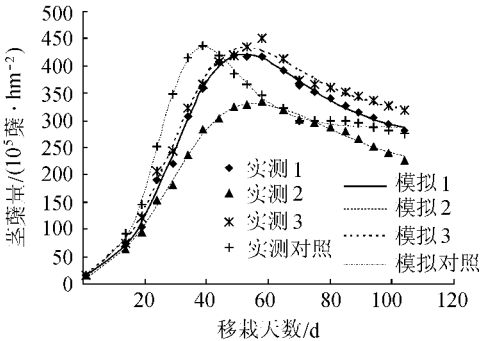


图 2 水稻茎蘖动态模拟结果

Fig. 2 Simulated results of shoot dynamics of rice

图 2 显示模拟结果与实测结果之间的同步变化,除个别处理在拐点处模拟误差稍大外,绝大部分模拟结果与实测值吻合良好.表 4 统计结果表明,采用套接的 Logistic 曲线模拟水稻茎蘖动态变化规律是可行的,模拟结果的均方误差 RMSE 在 $5.37 \times 10^5 \sim 9.54 \times 10^5$ 株/hm² 之间,决定系数均在 0.99 以上,在 0.01 显著性水平显著.

对比最大茎蘖量模拟结果与实测结果可以发现(表 5),模拟结果与实测结果误差范围为 $2.4 \times 10^5 \sim 18.2 \times 10^5$ 株/hm² 之间,平均误差为 6.7×10^5 株/hm².除处理 2 误差较大,为 18.2×10^5 株/hm² 外,其余 3 个处理的误差均在 3.5×10^5 株/hm² 以内,平均相对误差与最大相对误差分别为 1.63% 和 4.03%.最大值出现的时间对比模拟结果的误差范围为 0 ~ 5 d,平均误差 2.5 d,平均相对误差与最大相对误差分别为 4.54% 和 8.62%.由模拟模型各参数的意义可以发现, $K_1 - K_2$ 与最终成穗数有着密切的关系.比较 $K_1 - K_2$ 与最终成穗数可以发现,两者之间的误差在 $12.1 \times 10^5 \sim 28.6 \times 10^5$ 穗/hm² 之间,平均误差 17.1×10^5 穗/hm²,平均相对误差与最大相对误差分别为 6.5% 和 12.6%.

3.3 模拟模型参数的变化

b_1, b_2 反映了曲线上升段和下降段趋近最大值的速度.分析不同水分调控条件下参数的对比情况发现

(表 4),覆膜旱作条件下 b_1 , b_2 降低,土壤水分控制标准越低, b_1 越小. 表明土壤水分控制标准越低,曲线上升越缓慢,到达峰值的时间越滞后.

3.4 茎蘖变化动态模拟分析

通过对水稻茎蘖动态模拟模型求取一阶和二阶导数,可以了解茎蘖增长与降低的连续动态变化规律. 分析分蘖期不同水分调控策略下覆膜旱作水稻茎蘖增长速率的模拟结果表明(图 3),土壤水分调控条件下,处理 1,2,3 水稻茎蘖增长速率最大值分别为 13.57×10^5 , 9.51×10^5 和 13.54×10^5 株/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),低于对照处理的 20.31×10^5 株/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),在移栽后 29 d 达到最大增长速率,比对照处理的第 25 天滞后 4 d. 在茎蘖逐渐减小的阶段,处理 1,2,3 的水稻最大茎蘖消亡速率分别在第 70 天、77 天和 69 天达到最大值,为 3.92×10^5 , 2.68×10^5 和 3.30×10^5 株/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),低于对照处理的 6.29×10^5 株/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),出现时间晚于常规灌溉的第 51 天. 茎蘖增长速率为零时水稻茎蘖量达到最大值. 分析模拟增长速率的零点表明,处理 1,2,3 的最大茎蘖量分别在第 52 天、56 天和 53 天达到最大值,迟于对照处理的第 39 天,表明土壤水分调控条件下覆膜旱作水稻茎蘖最大增长速率与最大茎蘖量降低,出现时刻提前,提前转入茎蘖消亡过程,且消亡速率降低、消亡高峰延迟.

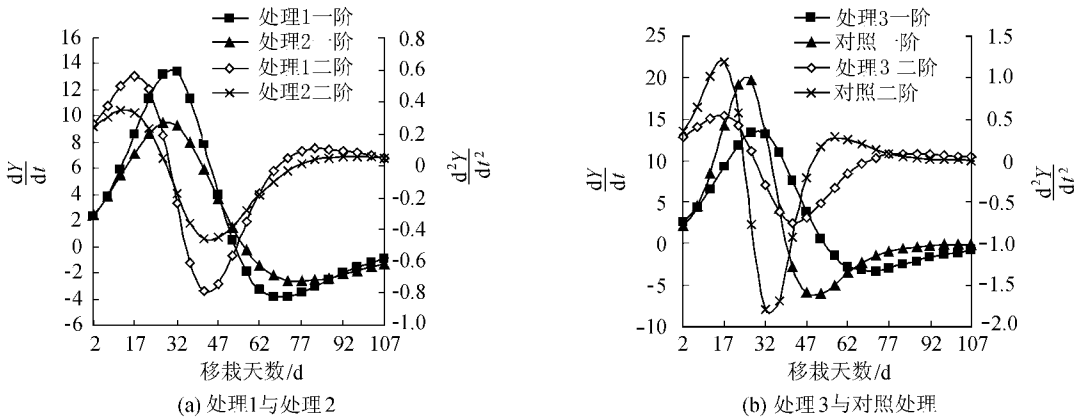


图 3 水稻茎蘖增长速率模拟结果

Fig. 3 Simulated results of shoot reproduction rate of rice

4 结 论

在覆膜旱作条件下研究了不同土壤水分调控策略对水稻茎蘖动态变化规律的影响,采用套接的 Logistic 曲线建立了水稻茎蘖动态模拟模型. 结果表明 覆膜旱作水稻的茎蘖动态发生新的变化. 分蘖前期茎蘖增长缓于浅湿灌溉对照处理,达到分蘖高峰期时间推迟,时间滞后 10 ~ 20 d. 覆膜旱作水稻分蘖前期和分蘖后期土壤含水率分别在田间持水率的 70% 和 60% 以上范围时,土壤水分控制越低,最高茎蘖量越低;土壤含水率分别在田间持水率的 60% 和 50% 时,水稻产生补偿效应,取得较高茎蘖量,但茎蘖高峰出现时间延迟较多,形成了更多的小穗,虽然产量得以维持,但与优质高产栽培攻主茎、成大穗相矛盾. 采用套接的 Logistic 曲线能够很好地模拟不同水分调控条件下的水稻茎蘖动态变化规律,反映土壤水分控制条件下水稻茎蘖增长受限,增长过程提前、茎蘖消亡减小、消亡高峰延迟的变化特点.

参考文献:

[1] 孟亚利. 基于过程的水稻生长模拟模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2002.

[2] 苏祖芳, 张娟, 王辉斌, 等. 水稻群体茎蘖动态与成穗率和产量形成关系的研究[J]. 江苏农学院学报, 1997, 18(1): 36-40.

(SU Zu-fang, ZHANG Juan, WANG Hui-bin, et al. Study on relationship of tiller development of rice population with the effective ear percentage and rice formulation[J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1997, 18(1): 36-40. (in Chinese))

- [3] 郑桂萍,李红宇,刘丽华,等. 土壤水势对寒地水稻穗部性状及产量的影响[J]. 中国水稻科学,2006,20(4):417-423. (ZHENG Gui-ping,LI Hong-yu,LIU Li-hua,et al. Effects of soil water potential on panicle characters and yield of rice in cole region [J]. Chinese Journal of Rice Science,2006,20(4):417-423. (in Chinese))
- [4] 陈书强,郑桂萍,李金峰,等. 土壤水分对寒地水稻生育特性和物质积累的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(1):14-19. (CHEN Shu-qiang,ZHENG Gui-ping,LI Jin-feng,et al. Effect of soil moisture on growth and dry matter accumulation of rice in cold region[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2007,38(1):14-19. (in Chinese))
- [5] 路兴花,吴良欢,刘铭,等. 覆膜旱作对水稻生长发育及某些生理特性的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(6):609-614. (LU Xing-hua,WU Liang-huan,LIU Ming,et al. Effect of film mulched cultivation on growth and some physiological characteristics of rice[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences,2002,28(6):609-614. (in Chinese))
- [6] 程旺大,张国平,赵国平,等. 嘉早935水稻覆膜旱栽的物质积累及运转研究[J]. 作物学报,2003,29(3):413-418. (CHENG Wang-da,ZHANG Guo-ping,ZHAO Guo-ping,et al. Differences in accumulation and translocation of the nutrients and dry matter between dry and paddy cultures of rice cultivar Jia-Zao 935[J]. Acta Agronomica Sinica,2003,29(3):413-418. (in Chinese))
- [7] 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. (PENG Shi-zhang,LI Rong-chao. Calculation models of rice evapotranspiration in plastic film mulched dryland[J]. Journal of Hohai University: Natural Science,2001,29(3):51-54. (in Chinese))
- [8] 张正良,彭世彰. 不同灌溉方式水稻产量构成因素投影寻踪评价方法[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(6):773-776. (ZHANG Zheng-liang,PENG Shi-zhang. Evaluation methods for component factors of rice yield based on projection pursuit classification model under different irrigation patterns[J]. Journal of Hohai University: Natural Science,2008,36(6):773-776. (in Chinese))
- [9] 孙成明,庄恒扬,杨连新,等. FACE水稻茎蘖动态模型[J]. 应用生态学报,2006,17(8):1448-1452. (SUN Cheng-ming,ZHUANG Heng-yang,YANG Lian-xin,et al. Dynamic model of rice tiller in FACE[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(8):1448-1452. (in Chinese))
- [10] 王夫玉,黄丕生. 水稻群体茎蘖消长模型及群体分类研究[J]. 中国农业科学,1997,30(1):59-66. (WANG Fu-yu,HUANG Pi-sheng. Study on basic dynamic model for stem and tiller growth and population classification in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica,1997,30(1):59-66. (in Chinese))
- [11] 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. (PENG Shi-zhang,LI Rong-chao,ZHU Cheng-li. Dry matter growth model for paddy in water-saving irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002(11):99-102. (in Chinese))
- [12] 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. (YANG Jian-tang,WANG Wen-liang,HUO Xiao-ting,et al. Studies on the relationship between the course of the dry matter accumulation in aerial parts in flue-cured tobacco and the available accumulation temperature[J]. Journal of Henan Agricultural University,2004,38(1):28-32. (in Chinese))

Effect of soil moisture regulation during tillering period on shoot dynamics of rice cultivated in plastic film mulched dryland and its simulation

XU Jun-zeng^{1,2}, PENG Shi-zhang^{1,2}, WEI Zheng^{1,2}

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

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on soil moisture regulation tests on rice during the tillering period, the effect of soil moisture regulation on shoot dynamics of rice cultivated in plastic film mulched dryland was studied. A model for the shoot dynamics was established by use of the nested Logistic curve. On such a basis, the variation of model parameters and the characteristics of shoot dynamics were discussed under different soil moisture regimes. The test results show that the shoot dynamics of rice cultivated in plastic film mulched dryland has new situations. The increase of tillering number in plastic film mulched dryland is slower than that in shallow irrigation treatment. The time reaching the maximum tillers is delayed about 10 ~ 20 d. With the decrease of soil moisture, the maximum tillers decrease. For the treatment scheme No. 3 with the lowest soil moisture, the maximum tillers are achieved because of the compensation effects, though the time reaching the maximum tillers is greatly delayed. The nested Logistic curve is satisfactory in the simulation of shoot dynamics of rice under different soil moisture regimes. The simulated results indicate that the shoot dynamics of rice under different soil moisture regimes is characterized by restricted growth, early time, decrease of tillering consumption and delay.

Key words: rice; shoot dynamics; soil moisture regulation; nested Logistic curve