

灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响

俞双恩 张梦婷 陈凯文 李倩倩 王 梅
(河海大学农业工程学院, 南京 210098)

摘要: 为探究灌排模式、施氮水平对水稻株高、茎蘖生长动态的影响,以稻田水位作为调控指标,通过测坑控水试验,采用 Logistic 曲线以及 DMOR 数学模型定量分析不同施氮水平下分蘖期先旱后涝(FHL)、拔节孕穗期先旱后涝(BHL)以及控制灌排(CID)3种处理对株高、茎蘖生长动态的影响。结果表明:灌排模式主要通过改变水稻株高、茎蘖的生长时间以及生长速率来影响株高、茎蘖生长,最大株高由大到小表现为 CID 处理、FHL 处理、BHL 处理,最大茎蘖数由大到小表现为 CID 处理、BHL 处理、FHL 处理。施氮主要是通过提高水稻株高、茎蘖的生长速率来促进株高、茎蘖生长;最大株高随着施氮量的增加而增加,CID 和 FHL 两种处理下,最大株高由施氮 150 kg/hm² 的 98.9、97.8 cm 增加到施氮 300 kg/hm² 的 102.4、101.2 cm,继续施氮没有显著提高;CID 处理和 BHL 处理下,最大茎蘖数随着施氮量的增加而增加;FHL 处理下,低氮处理和高氮处理的最大茎蘖数显著小于中氮处理。灌排模式与施氮水平的交互作用对株高、茎蘖数动态过程均有极显著影响,增施氮肥在一定程度上可以缓解因水分胁迫所引起的株高、茎蘖数的下降,但是高氮会加重水分胁迫,不利于株高、茎蘖的生长。

关键词: 水稻; 株高; 茎蘖; Logistic 曲线; DMOR 数学模型

中图分类号: S274; S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)11-0210-09

Effects of Irrigation and Drainage Modes and Nitrogen Levels on Rice Plant Height and Tiller Growth Dynamics

YU Shuang'en ZHANG Mengting CHEN Kaiwen LI Qianqian WANG Mei
(College of Agricultural Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effects of irrigation and drainage modes and nitrogen level on rice plant height and tiller growth dynamics, the water level in the paddy field was taken as the control index in the leaching-pond. Logistic curve and DMOR mathematical model were used to quantitatively analyze the effects of drought and flood alternating stress in tillering (FHL) and the drought and flood alternating stress in jointing-booting (BHL) stage and controlled irrigation and drainage treatment (CID) at different nitrogen levels on plant height and tiller dynamics. The results showed that the irrigation and drainage modes promoted the plant height and tillers mainly by changing the growth time and increasing growth rate of plant height and tillers. The maximum of plant height was shown as BHL, FHL and CID in descending order and the maximum number of tillers was shown as FHL, BHL and CID in descending order. Nitrogen fertilizer application promoted the plant height and tillers mainly by increasing growth rate of plant height and tillers. The maximum of plant height was increased with the increase of nitrogen application rate, from 98.9 cm and 97.8 cm with 150 kg/hm² input to 102.4 cm and 101.2 cm with 300 kg/hm² input, and no further significant increase was observed with more nitrogen input. Under the treatment of CID and BHL, maximum number of tillers was increased with the increase of nitrogen application rate. Under the treatment of FHL, the maximum tiller number under low nitrogen treatment and high nitrogen treatment was less than that under medium nitrogen treatment. The interaction between irrigation and drainage mode and nitrogen level had a very significant impact on the dynamic process of plant height and tillering. The decrease of plant height and tiller number caused by water stress could be alleviated by increasing nitrogen fertilizer to some extent. However, high nitrogen level can aggravate water stress, which was not conducive to the growth of plant height and tillers.

Key words: rice; plant height; tiller; Logistic curve; DMOR mathematical model

0 引言

株高和茎蘖数分别表征了植株在顶端优势的作用下纵向与横向的伸展能力,是描述作物生长的重要指标^[1],也是决定作物产量的重要农艺性状^[2-3]。近年来,对植物生长曲线数学模型的研究较多,常用的有 Logistics、Gompertz、von Bertaffany 以及 Richards 等非线性模型,其中,Logistics 模型能很好地模拟不同灌溉方式下水稻株高变化动态^[4-5]。水稻茎蘖消长模型主要根据积温、叶龄以及时间变化构建,其中适用性最广的是以时间替代综合环境应力作为自变量的模型^[6]。王夫玉等^[7]在以时间为自变量的水稻群体茎蘖消长常规曲线的基础上,通过微积分理论推导出水稻群体茎蘖消长的基本动力学模型(DMOR),该模型能全面、系统地描述水稻群体茎蘖消长变化的全过程,且模型特征明显,有利于进一步拓展研究和应用。

水和肥在水稻株高和茎蘖动态变化过程中起决定性作用^[8],合理的水肥运筹对提高水肥资源利用率和保证水稻高产、稳产具有重要意义。控制灌排和氮肥管理作为水稻水分、养分高效利用的新技术在我国南方水稻灌区得到广泛应用,但前人对控制灌排方式、氮肥管理技术的研究多偏重于单因子效应方面^[4,9-13],二者对水稻株高、茎蘖动态的耦合作用的研究鲜有报道。因此,本研究采用测坑试验、理论分析和数值模拟相结合的研究手段,通过 Logistic 方程和 DMOR 模型定量分析不同水肥组合处理对水稻株高和茎蘖动态发育变化趋势的影响,以期为制订水稻合理的灌排与施肥方案提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5—10 月在河海大学江宁校区的节水园区内进行。地理坐标东经 118°47′,北纬 31°55′,属于亚热带湿润性气候,多年平均降雨时间约为 120 d,多年平均降雨量 1 021.3 mm,降雨多集中于 5—9 月,占到全年降雨量的 60%。年均蒸发量 900 mm,年平均气温 15.7℃,日照时数 2 212.8 h,平均无霜期 237 d。

园区有 32 个蒸渗测坑,尺寸(长×宽×深)为 2.5 m×2.0 m×2.0 m,分南北两排布置,每排 16 个,其中 28 个有底,4 个无底,中间设地下廊道及地下设备间,每个有底测坑底部都通过一个水管与地下设备间的水柱相连通,以便控制测坑内的地下水位。地面设移动式雨棚,根据试验需要,可实时关闭。

测坑内土壤为粘壤土,由当地土回填而成。经过水旱轮作 10 余年,蒸渗仪内 0~30 cm 土壤田间持水率为 25.28%,土壤容重为 1.46 g/cm³,总孔隙度为 44.97%,pH 值为 6.97,土壤有机质质量分数为 2.19%,全氮质量比为 0.91 g/kg,速效氮质量比为 27.65 mg/kg,土壤全磷质量比为 0.32 g/kg,速效磷质量比为 12.5 mg/kg。

1.2 试验设计

供试水稻品种为南粳 9108,5 月 23 日泡种,5 月 25 日催芽,5 月 27 日下种,6 月 20 日泡田,6 月 27 日移栽,栽插密度为 20 cm×14 cm,每穴 3 棵籽苗,10 月 23 日收割。水稻依据病虫害情况按时喷洒农药。施肥情况见表 1。

表 1 测坑施肥方案
Tab.1 Fertilization status of test pit

施肥品种	施肥日期	施肥 水平	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	施肥量/ (kg·hm ⁻²)
基肥:复合肥 (N、P、K 质量分数 15%、15%、15%)	6 月 27 日	低		
		中	135.0	900.0
		高		
分蘖肥:尿素 (氮质量分数 46.4%)	7 月 11 日	低	15.0	30.0
		中	82.5	180.0
		高	157.5	340.0
穗肥:尿素 (氮质量分数 46.4%)	8 月 11 日	低	0	0
		中	82.5	180.0
		高	157.5	340.0

试验采用两因素三水平随机区组试验设计,其中水分管理为第 1 个因素,设 3 个水平,分别为控制灌排(CID)、分蘖期先旱后涝(FHL)、拔节孕穗期先旱后涝(BHL)。施氮为第 2 个因素,设 3 个水平,分别为纯氮 150、300、450 kg/hm²,记为 LN、CN 和 HN。控水方案见表 2。

先旱后涝各处理,生育期开始(分蘖期由于历时较长,可在分蘖期开始 7 d 后进行)自然耗干田面水层,农田水位为 0 时作为受旱开始日直到地下水埋深达到设定的下限值后立即灌水至淹水上限值,之后不补水,让其自然消退至控制灌溉的适宜灌水下限,然后按照控制灌排的水分条件进行控制。

控水期间,降雨时关闭雨棚。田面有水层时,通过测坑廊道进行地下排水,保持 2 mm/d 的田间渗漏量,田面无水层时,不进行地下排水(无田间渗漏量)。

1.3 测定项目和方法

茎蘖数:避开测坑边缘,每个测坑随机选定 6 穴,每 3 d 观测 1 次 6 穴的茎蘖数量,由此推算每个测坑茎蘖数。

株高:水稻移栽前测量 1 次株高。从分蘖期开

表 2 各处理控水方案
Tab.2 Water control schemes of treatments

灌排模式	处理编号	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	水分控制指标/cm			
			分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期
控制灌排	CIDLN	150				
	CIDCN	300	-20、3、10	-30、3、15	-20、3、15	-30、3、15
	CIDHN	450				
分蘖期先旱后涝	FHLLN	150				
	FHLCN	300	-50、15	-30、3、15	-20、3、15	-30、3、15
	FHLHN	450				
拔节孕穗期先旱后涝	BHLLN	150				
	BHLCN	300	-20、3、10	-50、20	-20、3、15	-30、3、15
	BHLHN	450				

注:以农田水位作为田间水分控制指标,单位为 cm,负值表示田间地下水埋深,正值表示田面水层深度。左边数值为灌水适宜下限,中间数值为灌水适宜上限,右边数值为降雨时允许蓄水深度(-50、15 cm 和 -50、20 cm 中左边数值为灌水适宜下限,右边数值为降雨时允许蓄水深度)。

始,每隔 5 d 定点观测 6 穴株高,先旱后涝处理在控水前后各加测 1 次。用刻度尺测量作物地面以上的高度(不包括根部),即田面至最高叶尖的高度。

1.4 水稻株高增长 Logistic 曲线模型

Logistic 曲线是具有固定拐点的一类“S”形生长曲线,描述了初始缓慢增长、中期快速生长、后期缓慢增长最后无限趋近最大值的一类生长过程^[14]。水稻株高分蘖期增长缓慢,拔节孕穗前期增长迅速,拔节孕穗后期增速减缓,其动态变化呈“S”形曲线,符合 Logistic 曲线的变化规律,Logistic 曲线模型具体表达式为

$$H = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} + C \tag{1}$$

式中 H ——移栽后一定时间的平均株高,cm
 t ——移栽后的时间,d
 k ——最大生长株高,cm
 a ——截距系数,表征基础状态参数
 b ——增长率系数,表征系统状态趋近的最大速度
 C ——初始株高,cm

方程中参数 k 为作物生长极限,最大株高 $H_{\max}$ 即为 k 与 C 的和,即

$$H_{\max} = k + C \tag{2}$$

对式(1)求导,得到株高的生长速率方程

$$v_H = \dot{H} = \frac{abke^{-bt}}{(1 + ae^{-bt})^2} \tag{3}$$

对式(1)求二阶导,得到株高变化的加速度方程

$$a_H = \ddot{H} = \frac{ab^2ke^{-bt}(-1 + ae^{-bt})}{(1 + ae^{-bt})^3} \tag{4}$$

令式(4)等于 0,可解得最大日生长速率时对应的时间为

$$T_{v\max} = \frac{\ln a}{b} \tag{5}$$

代入式(3)可解得最大日生长速率

$$v_{H\max} = \frac{bk}{4} \tag{6}$$

将式(3)在 $[0, T_1]$ 区间积分并平均得到株高平均生长速率 $v_{H\text{avg}}$, T_1 为移栽到水稻拔节孕穗期结束的总天数。

株高生长的特征量有最大株高、株高最大生长速率、达到最大生长速率时的时间以及株高平均生长速率,分别记为 $H_{\max}$ 、 $v_{H\max}$ 、 $T_{H\max}$ 、 $v_{H\text{avg}}$ 。

1.5 水稻茎蘖消亡 DMOR 模型

水稻茎蘖生长主要发生在分蘖期,而在拔节孕穗期开始后,主茎秆、穗和叶的迅速增长需要消耗大量营养物质,这时无效分蘖便因营养短缺而停止生长,最后逐渐消亡。

水稻茎蘖消长的动态主要反映在新生分蘖的产生和无效分蘖的灭亡,王夫玉等^[7]采用 2 个 Logistic 曲线进行嵌套的思路,分别模拟新生和消亡过程,推导出水稻群体茎蘖消长的基本动力学模型,即 DMOR 模型,其表达式为

$$N = \frac{k_1}{1 + me^{-ht}} - \frac{k_2}{1 + fe^{-gt}} + D \tag{7}$$

式中 N ——移栽后一定时间的分蘖数,万穗/hm²
 k_1 ——生长曲线中水稻群体分蘖达到最大的数量,万穗/hm²
 k_2 ——消亡曲线中水稻群体茎蘖消亡的最大数量,万穗/hm²
 $m、f$ ——趋近最大值的增长率与消亡率
 $h、g$ ——控制参数
 D ——基本茎蘖数,万穗/hm²

对式(7)进行求导,得到茎蘖变化的速率方程

$$v_N = \dot{N} = \frac{mhk_1 e^{-ht}}{(1 + me^{-ht})^2} - \frac{fgk_2 e^{-gt}}{(1 + fe^{-gt})^2} \quad (8)$$

令式(8)等于 0,可解得达到最大茎蘖数的时间 T_{Nmax} ,将 T_{Nmax} 代入式(7)解得最大茎蘖数 N_{max} 。

将式(8)在 $[0, T_2]$ 区间积分并平均得到茎蘖数的平均生长速率 v_{Savg} , T_2 为移栽至达到最大茎蘖数的总天数。将式(8)在 $[T_2, T_3]$ 区间积分并平均得到茎蘖数的平均消亡速率 v_{Xavg} , T_3 为移栽到生育期结束的总天数。

对式(7)求二阶导,得到茎蘖变化的加速度方程

$$a_N = \ddot{N} = \frac{mh^2 k_1 e^{-ht} (-1 + me^{-ht})}{(1 + me^{-ht})^3} - \frac{fg^2 k_2 e^{-gt} (-1 + fe^{-gt})}{(1 + fe^{-gt})^3} \quad (9)$$

式(8)为双拐点曲线,令式(9)等于 0,可解得两个零点,分别为达到最大生长速率时的时间 T_{Smax} 和最大消亡速度的时间 T_{Xmax} ,将 T_{Smax} 、 T_{Xmax} 分别代入式(8)解得茎蘖数的最大生长速率 v_{Smax} 以及茎蘖数的最大消亡速度 v_{Xmax} 。

而拟合茎蘖数生长动态的 DMOR 模型的求导形式较复杂,特征参数不易求得解析解,利用 Matlab 分别求取数值解。茎蘖数生长的特征量有最大茎蘖数、达到最大茎蘖数的时间、茎蘖数的最大生长速率、茎蘖数的平均生长速率、茎蘖数的最大消亡速率、茎蘖数的平均消亡速率,分别记为 N_{max} 、 T_{Nmax} 、 v_{Smax} 、 v_{Savg} 、 v_{Xmax} 、 v_{Xavg} 。

1.6 数据统计分析

试验测得的株高和移栽后时间采用 Logistic 曲线拟合,茎蘖数和移栽后时间采用 DMOR 模型拟合,所有拟合过程在 SPSS 22.0 软件中进行,采用相关系数(r)、均方根误差(RMSE)和标准化的均方根误差(nRMSE)对方程的拟合效果进行评估。相关系数 r 越接近 1, RMSE 越小,方程拟合效果越好。标准化的均方根误差对模型拟合评估标准^[15]为: nRMSE 小于 10%,模型表现极好; nRMSE 在 10% ~ 20%之间,表现好; nRMSE 在 20% ~ 30%之间,表现一般; nRMSE 大于等于 30%,表现很差。对方程拟合效果进行评估后,通过 Matlab 求解株高和茎蘖动态拟合方程的特征参数,采用考虑参数相关性的多元方差分析(MANOVA)方法^[16]分析水氮管理对株高和茎蘖动态过程的影响。多元方差分析在 SPSS 22.0 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 方程拟合效果评估

利用 Logistic 方程拟合株高生长动态数据,决定

系数 R^2 在 0.968 ~ 0.984 之间变化 ($P < 0.05$)。由表 3 可知, Logistic 方程中表征株高生长极限的参数 k 变化范围较小,变异系数 C_V 为 0.036; 参数 a 变化范围较大,变异系数 C_V 达到 0.075。

表 3 水稻株高的 Logistic 方程拟合参数

Tab.3 Fitting parameters of Logistic equations of plant height

灌排模式	施氮水平	参数				R^2
		k/cm	a	b	C/cm	
CID	LN	68.926	9.664	0.067	30.000	0.968
	CN	72.363	9.906	0.069	30.000	0.973
	HN	73.364	11.027	0.071	30.000	0.969
FHL	LN	67.821	9.183	0.068	30.000	0.975
	CN	71.174	10.158	0.072	30.000	0.981
	HN	71.508	9.816	0.072	30.000	0.973
BHL	LN	66.545	9.641	0.063	30.000	0.982
	CN	68.425	9.398	0.063	30.000	0.984
	HN	66.781	8.348	0.061	30.000	0.982
变异系数 C_V		0.036	0.075	0.064	0	

由表 4 可知, DMOR 方程中表征水稻群体分蘖达到最大数量的参数 k_1 和茎蘖消亡最大数量的参数 k_2 变化范围较小,变异系数 C_V 分别为 0.137 和 0.240; 参数 m 、 f 变化范围较大,变异系数 C_V 分别达到 1.383 和 1.459。

由图 1 可以看出,模拟和实测的株高和茎蘖数较均匀地分布在 1:1 线附近,其中模拟和实测株高的 r 、RMSE 和 nRMSE 分别为 0.987、2.716 cm 和 3.608%,模拟与实测茎蘖数的 r 、RMSE 和 nRMSE 分别为 0.991、12.736 万穗/hm² 和 3.866%。模拟值和实测值两者之间的相关系数 r 均在 0.95 以上, nRMSE 均小于 10%,表明 Logistic 方程对株高生长动态的模拟以及 DMOR 模型对茎蘖数变化动态的模拟均达到极好的水平,可以用于分析不同水氮管理对株高和茎蘖数生长过程的影响。

2.2 水氮管理对株高动态过程的影响

各个处理水稻株高生长动态基本一致,分蘖期水稻株高及生长速率稳定增加,到拔节期水稻株高生长最为旺盛,随后株高生长速率逐渐下降,到抽穗开花期水稻株高趋于稳定。

水稻株高动态特征的方差分析及多重比较结果见表 5。结果表明,灌排模式对 H_{max} 、 v_{Hmax} 、 T_{Hmax} 以及 v_{Havg} 均有极显著影响,表明灌排模式主要是通过影响水稻株高的生长时间以及株高的生长速率来影响最大株高。施氮对 H_{max} 、 v_{Havg} 有极显著影响,对 v_{Hmax} 有显著影响,对 T_{Hmax} 无显著影响,表明施氮主要是通过影响水稻株高的生长速率来影响最大株高。灌水施氮的交互作用对 H_{max} 有极显著影响,对

表 4 水稻茎蘖数的 DMOR 模型拟合参数

Tab.4 Fitting parameters of DMOR equations of stem tillers

灌排模式	施氮水平	参数							R^2
		$k_1/(万穗 \cdot hm^{-2})$	m	h	$k_2/(万穗 \cdot hm^{-2})$	f	g	$D/(万穗 \cdot hm^{-2})$	
CID	LN	354.702	2 321.343	0.347	149.554	948.183	0.138	70.000	0.987
	CN	496.483	2 089.947	0.329	163.954	947.709	0.197	70.000	0.990
	HN	453.639	1 336.920	0.333	105.785	944.801	0.178	70.000	0.970
FHL	LN	390.894	228.121	0.221	209.067	155.872	0.128	70.000	0.989
	CN	440.595	407.408	0.240	189.086	1 735.781	0.166	70.000	0.977
	HN	350.757	148.484	0.206	142.426	1 065.157	0.135	70.000	0.968
BHL	LN	391.274	2 698.677	0.351	191.130	72.787	0.110	70.000	0.970
	CN	513.985	1 180.644	0.286	248.927	9 732.224	0.249	70.000	0.991
	HN	422.921	10 557.558	0.440	161.184	11 865.601	0.251	70.000	0.967
变异系数	C_V	0.137	1.383	0.245	0.240	1.459	0.298	0	

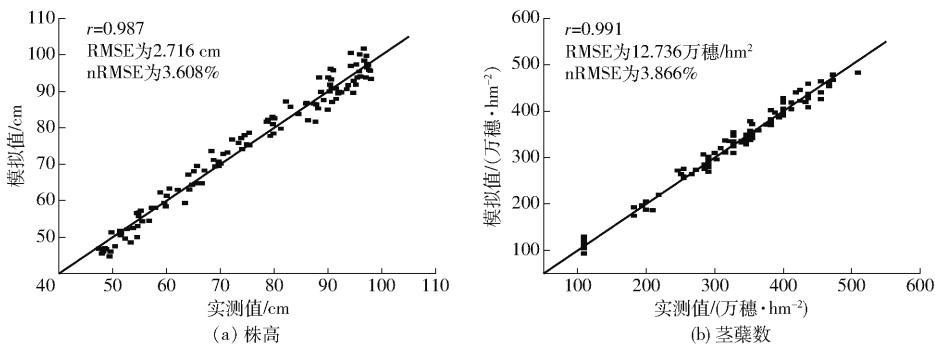


图 1 水稻株高和茎蘖数的实测值与模拟值

Fig.1 Observed and simulated values of plant height and tiller number

表 5 不同灌排模式、施氮水平下水稻株高的动态特征和方差分析

Tab.5 Characteristic parameters describing plant height dynamic process of rice under different irrigation and drainage modes and nitrogen application levels					
灌排模式	施氮水平	H_{max}/cm	$v_{Hmax}/(cm \cdot d^{-1})$	$v_{Havg}/(cm \cdot d^{-1})$	T_{Hmax}/d
CID	LN	(98.9 ± 0.1) ^c	(1.159 ± 0.078) ^b	(0.896 ± 0.037) ^b	(33.604 ± 0.348) ^b
	CN	(102.4 ± 0.2) ^{ab}	(1.242 ± 0.022) ^a	(0.955 ± 0.006) ^a	(33.345 ± 0.428) ^b
	HN	(103.4 ± 0.2) ^a	(1.301 ± 0.043) ^a	(0.983 ± 0.019) ^a	(33.793 ± 0.081) ^{bc}
FHL	LN	(97.8 ± 0.8) ^{cd}	(1.158 ± 0.047) ^b	(0.898 ± 0.019) ^b	(32.389 ± 0.357) ^{cd}
	CN	(101.2 ± 0.6) ^b	(1.287 ± 0.066) ^a	(0.974 ± 0.033) ^a	(32.106 ± 1.430) ^d
	HN	(101.5 ± 1.1) ^b	(1.282 ± 0.094) ^a	(0.975 ± 0.038) ^a	(31.761 ± 0.937) ^d
BHL	LN	(96.5 ± 1.1) ^e	(1.042 ± 0.008) ^c	(0.813 ± 0.004) ^c	(36.121 ± 0.328) ^a
	CN	(98.4 ± 0.5) ^c	(1.080 ± 0.001) ^c	(0.845 ± 0.004) ^c	(35.477 ± 0.244) ^a
	HN	(96.8 ± 0.7) ^{de}	(1.009 ± 0.063) ^c	(0.805 ± 0.032) ^c	(34.978 ± 0.478) ^a
多元方差分析	灌排	**	**	**	**
	施氮	**	*	**	
	灌排 × 施氮	**		*	

注:同列不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著; ** 和 * 分别表示相关性在 1%、5% 水平上显著。下同。

v_{Havg} 有显著影响,对 v_{Hmax} 、 T_{Hmax} 无显著影响。

CID 和 FHL 处理下, H_{max} 随着施氮量的增加而增加,HN、CN 处理与 LN 处理差异显著,HN、CN 处理差异不显著,由施氮 150 kg/hm² 的 98.9、97.8 cm 增加到施氮 300 kg/hm² 的 102.4、101.2 cm,继续施氮没有显著提高。BHL 处理下,HN 处理的 H_{max} 显著小于 CN 处理, LN 处理与 HN 处理差异不显著,

表明灌排模式与施氮水平对 H_{max} 有显著的交互作用。施氮水平一致时, H_{max} 由大到小表现为 CID 处理、FHL 处理、BHL 处理,3 种处理 H_{max} 均值分别为 101.6、100.2、97.3 cm。

v_{Hmax} 和 v_{Havg} 有极强的相关性,相关系数达到 0.998。CID 和 FHL 处理下, v_{Hmax} 和 v_{Havg} 表现为 HN、CN 处理显著大于 LN 处理,HN、CN 处理差异不显

著,BHL 处理下,不同施氮水平之间的差异不显著。施氮水平一致时, v_{Hmax} 和 v_{Havg} 均表现为 CID 处理、FHL 处理显著大于 BHL 处理。

灌排模式一致时,不同的施氮水平下的 T_{Hvmax} 均无显著差异。施氮水平一致时, T_{Hvmax} 由大到小表现为 BHL 处理、CID 处理、FHL 处理,3 种处理达到最大生长速率的时间均值分别为 35.525、33.581、32.085 d,三者之间差异显著,表明不同生育期的先早后涝处理对株高生长时间的影响不一致。

2.3 水氮管理对茎蘖生长动态过程的影响

各处理茎蘖数总体变化趋势一致。分蘖初期,水稻群体快速分蘖,茎蘖数及其生长速率迅速增加,并随着生长速率达到最大值,水稻生长趋于旺盛。分蘖后期,茎蘖生长速率逐渐减小,但水稻分蘖仍继

续进行。分蘖期末,茎蘖数量累计达到最大值后,水稻有效分蘖逐渐停止,主要进行无效分蘖的消亡,并最终在抽穗开花期茎蘖数趋于稳定。

水稻茎蘖动态特征的方差分析及多重比较结果见表 6。结果表明灌排模式对 T_{Nmax} 、 N_{max} 、 v_{Smax} 、 v_{Savg} 以及 v_{Xmax} 均有极显著影响,对 v_{Xavg} 有显著影响,表明灌排模式主要通过影响水稻茎蘖的生长时间以及茎蘖的生长、消亡速率来影响水稻茎蘖动态。施氮对 N_{max} 、 v_{Savg} 有极显著影响,对 v_{Xmax} 、 v_{Xavg} 有显著影响,对 T_{Nmax} 、 v_{Smax} 无显著影响,表明施氮主要是通过影响水稻茎蘖的生长、消亡速率来影响水稻茎蘖动态。灌水施氮的交互作用对 N_{max} 有极显著影响,对 v_{Savg} 、 v_{Xmax} 有显著影响,对 T_{Nmax} 、 v_{Smax} 、 v_{Xavg} 无显著影响。

CID 和 BHL 处理下, N_{max} 随着施氮量的增加而

表 6 不同灌排模式、施氮水平下水稻茎蘖数的动态特征和方差分析

Tab.6 Characteristic parameters describing stem tillers dynamic process of rice under different irrigation and nitrogen regimes							
灌排模式	施氮水平	T_{Nmax}/d	$N_{max}/$	$v_{Smax}/$	$v_{Savg}/$	$v_{Xmax}/$	$v_{Xavg}/$
			(万穗·hm ⁻²)	(万穗·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(万穗·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(万穗·hm ⁻² ·d ⁻¹)	(万穗·hm ⁻² ·d ⁻¹)
CID	LN	(34.5 ± 0.5) ^c	(381.221 ± 22.207) ^c	(27.243 ± 3.036) ^{ab}	(9.031 ± 0.776) ^b	(4.700 ± 0.436) ^c	(3.326 ± 0.222) ^{bc}
	CN	(34.0 ± 2.0) ^{cd}	(465.190 ± 14.392) ^{ab}	(31.942 ± 6.140) ^a	(11.669 ± 1.128) ^a	(6.966 ± 0.924) ^{bc}	(4.382 ± 1.186) ^{abc}
	HN	(34.0 ± 1.0) ^{cd}	(472.935 ± 11.792) ^a	(31.595 ± 5.118) ^{ab}	(11.848 ± 0.713) ^a	(5.345 ± 1.696) ^c	(3.866 ± 1.112) ^{bc}
FHL	LN	(36.5 ± 0.5) ^b	(335.665 ± 13.766) ^d	(17.393 ± 1.247) ^c	(7.267 ± 0.484) ^c	(4.427 ± 0.571) ^c	(3.197 ± 0.524) ^c
	CN	(38.5 ± 1.5) ^a	(434.090 ± 12.409) ^b	(23.462 ± 1.872) ^{bc}	(9.453 ± 0.697) ^b	(5.816 ± 1.286) ^{bc}	(3.858 ± 1.224) ^{bc}
	HN	(39.0 ± 1.0) ^a	(364.682 ± 18.203) ^{cd}	(16.872 ± 0.720) ^c	(7.490 ± 0.277) ^c	(4.363 ± 0.210) ^c	(2.997 ± 0.036) ^c
BHL	LN	(32.0 ± 0.1) ^{de}	(356.883 ± 30.157) ^{cd}	(27.232 ± 4.438) ^{ab}	(9.001 ± 0.983) ^b	(5.120 ± 0.128) ^c	(3.263 ± 0.497) ^c
	CN	(33.0 ± 0.1) ^{cde}	(439.125 ± 32.698) ^{ab}	(31.102 ± 0.864) ^{ab}	(11.258 ± 0.906) ^a	(8.468 ± 3.627) ^{ab}	(4.903 ± 1.159) ^{ab}
	HN	(31.5 ± 1.5) ^e	(453.801 ± 9.088) ^{ab}	(35.465 ± 8.316) ^a	(12.205 ± 0.891) ^a	(10.997 ± 1.053) ^a	(5.783 ± 0.635) ^a
多元方差分析	灌排	**	**	**	**	**	*
	施氮		**		**	*	*
	灌排 × 施氮		**		*	*	

增加,HN、CN 处理与 LN 处理差异显著,HN 处理与 CN 处理差异不显著, N_{max} 由施氮 150 kg/hm² 的 381.221、356.883 万穗/hm² 增加到施氮 300 kg/hm² 的 465.190、439.125 万穗/hm²。FHL 处理下,LN 处理和 HN 处理的 N_{max} 显著小于 CN 处理,LN 处理与 HN 处理差异不显著。施氮水平一致时, N_{max} 从大到小表现为 CID 处理、BHL 处理、FHL 处理,3 种处理 N_{max} 均值分别为 439.782、416.603、378.146 万穗/hm²。

FHL 处理下, T_{Nmax} 随施氮量的增加而增加,HN、CN 处理与 LN 处理差异显著,HN 处理与 CN 处理不显著,CID 处理、BHL 处理下,不同的施氮水平下的 T_{Nmax} 均无显著差异。施氮水平一致时, T_{Nmax} 由大到小表现为 FHL 处理、CID 处理、BHL 处理,3 种处理达到最大分蘖数的时间的均值分别为移栽后第 38.000、34.167、32.167 天,FHL 处理与 BHL 处理差异显著,表明不同生育期的先早后涝处理对茎蘖生长时间的影响不一致。

v_{Smax} 与 v_{Savg} 相关性较强,相关系数达到 0.948。灌排模式一致时,不同的施氮水平下的 v_{Smax} 均无显著差异。 v_{Savg} 在 CID、BHL 处理下表现为 CN、HN 处理显著大于 LN 处理, v_{Savg} 由施氮 150 kg/hm² 的 27.243、27.232 万穗/(hm²·d) 增加到施氮 300 kg/hm² 的 31.942、31.102 万穗/(hm²·d),继续施氮均没有显著变化。在 FHL 处理下表现为 CN 处理显著大于 LN、HN 处理,表明不同灌排模式下,施氮量对 v_{Savg} 的影响不一致。施氮水平一致时, v_{Smax} 与 v_{Savg} 表现为 CID、BHL 处理显著大于 FHL 处理。

v_{Xmax} 与 v_{Xavg} 相关性较强,相关系数达到 0.985。CID、FHL 处理下,不同的施氮水平下的 v_{Xmax} 与 v_{Xavg} 均无显著差异。BHL 处理下, v_{Xmax} 与 v_{Xavg} 均表现为 CN、HN 处理显著大于 LN 处理。LN、CN 条件下, v_{Xmax} 与 v_{Xavg} 表现为 CID、FHL 和 BHL 处理无显著差异。HN 条件下,BHL 处理的 v_{Xmax} 、 v_{Xavg} 显著大于 CID、FHL 处理。

3 讨论

株高与分蘖是与水稻群体质量以及籽粒产量密切相关的农艺性状,灌排模式和施氮水平是影响水稻株高与茎蘖动态的两个主要因素。株高初始缓慢增长,中期快速生长,后期基本不变,呈“S”形变化。而茎蘖数随着生育进程的延续先逐渐增大后逐渐减小,呈现单峰曲线变化趋势。

3.1 灌排模式对株高、茎蘖数的影响

灌溉排水是影响水稻生长的重要栽培措施,适宜的灌排措施可以优化株型、增加产量,提高资源利用率。大量研究表明受旱对株高、茎蘖生长产生抑制作用^[8-9],适度水分亏缺后复水,株高、茎蘖生长均会出现补偿甚至超补偿效应^[17]。本研究结果表明 FHL 处理显著提前了达到最大生长速率的时间,对株高生长速率无显著影响,BHL 处理显著延迟了达到最大生长速率的时间,并且显著地降低株高生长速率。这可能是由于本研究 FHL 处理中干旱胁迫抑制了水稻株高生长,水稻水分胁迫由旱转涝后,在分蘖后期产生一定的补偿效应,促进株高的增长,从而缩短了水稻达到最大生长速率的时间。Logistic 方程只能描述水稻株高整个生育期内整体变化趋势,无法描述分蘖期前后这个短暂的株高剧变过程,从而无法反映 FHL 处理控水期间先慢后快的株高生长速率变化趋势。BHL 处理破坏了根系内部的平衡,影响水稻吸收水分与养分的能力^[18],且 BHL 处理的后效性小于 FHL 处理^[4,19-20],导致株高增速显著小于 CID 处理。

邓环等^[21]指出分蘖期水分不同程度的缺失会引起苗峰以及到达苗峰时间的不同。本研究表明 FHL 处理提前了达到最大分蘖数的时间,并且显著抑制水稻茎蘖生长,降低茎蘖增长速率。BHL 处理显著增大水稻茎蘖消亡速率,对茎蘖增长速率无显著影响。

3.2 施氮量对株高、茎蘖数的影响

合理施氮不仅能促进水稻增产增效,同时可以降低环境危害。孙永健^[22]指出不同灌水方式下,在 0~180 kg/hm²施氮量范围内,随着施氮量的增大,株高及穗部性状指标均呈增加趋势,但是施氮量达到 270 kg/hm²时,株高及穗部性状指标增加不显著,甚至造成粒密度显著下降。大量研究表明在一定范围内株高、茎蘖数均随氮肥用量的增加而增加^[23-24]。本研究在不同施氮水平下得到的分析结果表明,氮肥用量在一定范围内,株高、茎蘖数均随

氮肥用量的增加而增加,但是随着施氮水平的提高,增施氮肥不会引起水稻株高和茎蘖数的增加,水稻茎蘖数的生长速率与消亡速率也具有上述的变化规律。这可能是由于水稻吸收氮素的总量与施氮水平存在报酬递减的规律^[22],氮素水平从 LN 处理上升至 CN 处理,水稻对氮素的吸收利用量增大,但当施氮水平超过某一范围继续上升时,水稻对氮素的吸收利用量不会增加,并且会导致氮肥吸收利用率的降低。

3.3 灌排模式和施氮对株高、茎蘖数的交互作用

水、氮在作物生长发育过程中是两个相互影响、相互制约的因子,不同的土壤水分条件下土壤中氮肥的效益不同^[25]。大量研究表明土壤水分胁迫条件下水稻的“以肥调水”作用受到土壤干旱程度及施氮量的影响^[26-28,8]。本研究中灌水施氮交互作用对水稻的株高和茎蘖数均有极显著的影响,增施氮肥在一定程度上可以缓解因水分胁迫所引起的株高、茎蘖数的下降,但是 BHL 处理下的 HN 处理显著抑制了株高生长,FHL 处理下的 HN 处理抑制了茎蘖生长。这可能是由于水稻株高在拔节孕穗期对水氮最为敏感,茎蘖生长在分蘖期对水氮最为敏感,本试验处理中土壤干旱程度较重,高氮加重了水分胁迫,降低了根系活力,不利于作物的生长。

4 结论

(1) Logistic 方程和 DMOR 模型可以较为准确地模拟不同灌排模式和施氮水平下水稻株高生长过程和茎蘖动态变化过程。

(2) 灌排模式主要通过改变水稻株高、茎蘖数的生长时间以及生长速率来影响株高、茎蘖生长。FHL 处理显著提前达到最大分蘖数的时间,降低茎蘖数增长速率,从而抑制水稻茎蘖生长。BHL 处理显著延迟株高达到最大生长速率的时间,降低了株高生长速率,从而显著降低了水稻株高。因此,应尽量避免水稻分蘖期、拔节孕穗期重度旱涝胁迫的发生。施氮主要通过提高水稻株高、茎蘖数的生长速率来影响株高、茎蘖生长。

(3) 灌排模式与施氮水平的交互作用对株高以及茎蘖动态过程均有极显著的影响。增施氮肥在一定程度上可以缓解因水分胁迫所引起的株高、茎蘖数的下降,但是高氮会加重水分胁迫,降低根系活力,不利于作物的生长。因此,在水稻生育期内进行合理的水肥运筹可以达到控制植株生长、构建理想株型、提高稻田养分利用率的目的。

参 考 文 献

- [1] 李正鹏,宋明丹,冯浩. 水氮耦合下冬小麦 LAI 与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报,2017,33(4): 195–202.
LI Zhengpeng, SONG Mingdan, FENG Hao. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 195–202. (in Chinese)
- [2] KHUSH G S. Green revolution: preparing for the 21st century [J]. Genome, 1999, 42(4): 646.
- [3] CONWAY G, TOENNIESSEN G. Feeding the world in the twenty-first century [J]. Nature, 1999, 402(6761): C55–C58.
- [4] 王振昌,郭相平,吴梦洋,等. 旱涝交替胁迫条件下梗稻株高生长模拟与分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9):50–56.
WANG Zhenchang, GUO Xiangping, WU Mengyang, et al. Simulation and analysis of plant heights on nonlinear models of logistic, gompertz and von bertalanffy for rice under alternative drying and flooding treatments[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9):50–56. (in Chinese)
- [5] WU R L, MA C X, YANG M C K, et al. Quantitative trait loci for growth trajectories in *Populus*[J]. Genetical Research,2003, 81(1):51–64.
- [6] 戚昌瀚,殷新佑. 作物生长模拟的研究进展[J]. 作物杂志, 1994(4):1–2.
- [7] 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):57–64.
WANG Fuyu, HUANG Pisheng. Study on basic dynamic model for stem and tiller growth and population classification in rice [J]. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30(1):57–64. (in Chinese)
- [8] 周明耀,赵瑞龙,顾玉芬,等. 水肥耦合对水稻地上部分生长与生理性状的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(8):38–43.
ZHOU Mingyao, ZHAO Ruilong, GU Yufen, et al. Effects of water and nitrogen coupling on growth and physiological characteristics of overground part of rice[J]. Transactions of the CASE, 2006,22(8):38–43. (in Chinese)
- [9] 张逸迪,俞双恩,高世凯,等. 先旱后涝胁迫下水稻茎蘖及株高动态响应[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(1):77–81.
ZHANG Yidi, YU Shuang'en, GAO Shikai, et al. Rice tillering and plant height dynamic responses to drought and flood alternating stress[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1):77–81. (in Chinese)
- [10] 甄博,郭相平,陆红飞,等. 分蘖期旱涝交替胁迫对水稻生理指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(5):36–40.
ZHEN Bo, GUO Xiangping, LU Hongfei, et al. Impact of alternating drought and waterlogging during tillering stage on physiological traits of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(5):36–40. (in Chinese)
- [11] 郭相平,甄博,王振昌. 旱涝交替胁迫增强水稻抗倒伏性能[J]. 农业工程学报,2013,29(12):130–135.
GUO Xiangping, ZHEN Bo, WANG Zhenchang. Increasing lodging resistance performance of rice by alternating drought and flooding stress[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 130–135. (in Chinese)
- [12] 刘凤丽,彭世彰,徐俊增,等. 控制灌溉模式下水稻群体结构试验研究[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5):417–419.
LIU Fengli, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics of rice population under controlled irrigation condition[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2004,35(5):417–419. (in Chinese)
- [13] 陈书强. 氮肥运筹对水稻生育动态和茎蘖利用特征的影响[J]. 湖北农业科学,2018,57(6):20–25.
CHEN Shuqiang. Effect of nitrogen application regime on growth dynamics and stem tiller utilization traits of rice[J]. Hubei Agricultural Sciences,2018,57(6):20–25. (in Chinese)
- [14] SEPASKHAH A R, FAHANDEZH-SAAD I S, ZAND-PARSA S. Logistic model application for prediction of maize yield under water and nitrogen management[J]. Agricultural Water Management,2011, 99(1): 51–57.
- [15] BANNAYAN M, HOOGENBOOM G. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model [J]. Field Crops Research, 2009, 111(3): 290–302.
- [16] KEULS M, GARRETSEN F. Statistical analysis of growth curves in plant breeding[J]. Euphytica, 1982, 31(1): 51–64.
- [17] 施积炎,袁小凤,丁贵杰. 作物水分亏缺补偿与超补偿效应的研究现状[J]. 山地农业生物学报,2000,19(3):226–233.
SHI Jiyao, YUAN Xiaofeng, DING Guijie. The reviews of study on water deficit compensation and over-compensation effect for crops[J]. Journal of Mountain Agriculture & Biology, 2000,19(3):226–233. (in Chinese)
- [18] 吕银斐,任艳芳,刘冬,等. 不同水分管理方式对水稻生长、产量及品质的影响[J]. 天津农业科学,2016,22(11):106–110.
LYU Yinfei, REN Yanfang, LIU Dong, et al. Effects of different water managements on growth, grain yield and quality of rice [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2016,22(11):106–110. (in Chinese)
- [19] 郝树荣,郭相平,王文娟. 旱后复水对水稻生长的后效影响[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7):76–79.
HAO Shurong, GUO Xiangping, WANG Wenjuan. After effects of rewatering after water stress on the rice growth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):76–79. (in Chinese)
- [20] 肖梦华,胡秀君,褚琳琳. 水稻株高生长对旱涝交替胁迫的动态响应研究[J]. 节水灌溉, 2015(9):15–22.
XIAO Menghua, HU Xiujun, CHU Linlin. Dynamic response of rice plant height growth to water level control on condition of drought-waterlogging alternating stress[J]. Water Saving Irrigation, 2015(9):15–22. (in Chinese)
- [21] 邓环,曹凑贵,程建平,等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(3):602–606.

DENG Huan, CAO Cougui, CHENG Jianping, et al. Impact of different irrigation methods on biological characteristics of rice [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008,16(3):602-606. (in Chinese)

[22] 孙永健. 水氮互作对水稻产量形成和氮素利用特征的影响及其生理基础[D]. 成都:四川农业大学, 2010.
SUN Yongjian. Effects of water-nitrogen interaction on yield formation and characteristics of nitrogen utilization in rice and its physiological basis[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2010. (in Chinese)

[23] 田广丽, 周毅, 孙博, 等. 氮素及栽培密度影响水稻分蘖动态的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 896-904.
TIAN Guangli, ZHOU Yi, SUN Bo, et al. Effects of nitrogen and transplanting density on the mechanisms of tillering dynamic of rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 896-904. (in Chinese)

[24] 詹可, 邹应斌. 水稻分蘖特性及成穗规律研究进展[J]. 作物研究, 2007, 21(5): 588-592.

[25] 孔东, 晏云, 段艳, 等. 不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 36-40.
KONG Dong, YAN Yun, DUAN Yan, et al. Field experiment study on growth and yields of winter wheat under different water and nitrogen treatments[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 36-40. (in Chinese)

[26] 褚光, 陈婷婷, 陈松, 等. 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻产量以及水、氮利用效率的影响[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(5): 513-523.
CHU Guang, CHEN Tingting, CHEN Song, et al. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on rice yield and water and nitrogen use efficiencies[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(5): 513-523. (in Chinese)

[27] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J]. 中国农业科学, 1996, 29(4): 58-66.
YANG Jianchang, WANG Zhiqin, ZHU Qingsen. Effect of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different status of soil moisture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1996, 29(4): 58-66. (in Chinese)

[28] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同土壤水势与氮素营养对杂交水稻生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(2): 199-206.
CHENG Jianping, CAO Cougui, CAI Mingli, et al. Effect of different nitrogen nutrition and soil water potential on physiological parameters and yield of hybrid rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(2): 199-206. (in Chinese)