

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

李正鹏^{1,2}, 宋明丹^{1,2}, 冯浩^{1,2,3*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为了进一步阐明灌水施氮对小麦生长(叶面积指数(leaf area index, LAI)和株高)和产量的影响机制, 本研究在 2012-2014 年 2a 大田试验基础上, 采用修正的 Logistic 和 Richards 数学模型定量分析了不同灌水施氮处理对 LAI 和株高的动态发育的影响, 以及 LAI 和株高动态变化过程与产量及产量构成的回归关系。结果表明灌水能显著提高 LAI 的最大扩展速率(LRmax), 从而增大最大 LAI 和平均 LAI。施氮通过降低达到最大速率和最大 LAI 时的积温、增大 LRmax 来提高最大 LAI 和平均 LAI(分别由不施氮下的 1.87、1.35 cm²/cm² 增大到施氮 210 kg/hm² 条件下的 4.57、3.82 cm²/cm², 继续施氮, 增加效果不显著)。灌水通过延长株高生长时间来增大株高。施氮通过缩短株高进入快速生长期的时间和延长株高生长时间来增大株高, 最大株高由不施氮下的 58 cm 提高到施氮 105 kg/hm² 条件下的 65 cm, 继续施氮对株高增加不显著。年份对株高的生长影响显著。产量及产量构成与株高、LAI 过程的逐步回归分析表明产量由平均 LAI 和最大株高共同决定, 平均 LAI 主要决定了每平方米穗数, 而最大株高主要决定了千粒质量, 平均 LAI 对产量贡献更多。该研究为揭示水肥对作物生长过程和产量形成提供理论依据, 为合理调控作物群体结构提供技术支撑。

关键词: 灌溉; 氮; 作物; Logistic 方程; Richards 方程; 产量构成要素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.027

中图分类号: S512.1; S184

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-04-0195-08

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.027 http://www.tcsae.org

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 195-202. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.027 http://www.tcsae.org

0 引言

叶片是植物进行光合作用的主要场所, 植物同化产物的积累主要来源于叶片对光能的截获和利用。叶面积指数(leaf area index, LAI)是一个表征叶覆盖度的无量纲指标, 表示的是单位土地面积上的叶片面积, 是表征作物冠层结构以及进行作物生长模拟所需的重要参数。这一指标自 1947 年提出以来已经成为作物群体生长分析的重要内容^[1]。茎秆是运输水分、养分和有机物的通道, 同时也是植物的支撑器官, 顶端优势作用使茎秆向上生长, 同时促进植物叶片的合理均匀分布, 有利于光能的吸收和利用。株高是表征茎秆形态的主要农艺性状之一, 也是植物发育生物学的模式性状, 植株过高过矮都不利于植物光合产物的积累和产量的形成^[2]。

LAI 和株高随着植株的生育进程呈现有规律的变化, 关于 LAI 和株高的动态描述, 目前主要有经验模型和机理模型 2 大类。机理模型能综合考虑影响植株生长的光、温、水、肥和品种特性等因素, 但是结构复杂, 所需确定的参数较多^[3-5]。而经验模型以其参数少, 针对性强的特点得到了广泛应用。王信理^[6]首先提出了 LAI 随生育天数变化的修正的 Logistic 模型。于强等^[7]在修正的 Logistic 模型基础上考虑了干物质质量对 LAI 的影响, 提出了基于干物质重和生育天数的普适生长模型, 并将其应用于水稻。张宾等^[8]利用积温代替生育天数, 建立了描述冬小麦、春玉米和水稻 LAI 的动态归一化的 Rational 模型。株高的动态过程与干物质质量积累相似, 可以应用 Logistic^[9]和 Richards^[10]生长方程进行描述分析。目前针对 LAI 的定量描述主要集中在高产条件下, 不同水氮胁迫条件下 LAI 的动态生长分析较少, 而株高的研究大部分集中于探究不同品种、栽培措施对最终株高的影响, 而对株高发育动态过程的研究较少。

株高和 LAI 是描述作物生长的重要指标, 分别表示了作物纵向伸展和横向扩展的能力, 2 者与干物质质量和产量的形成密切相关。作物 LAI 和株高的动态变化过程受多种因素的影响, 其中水分和氮素是限制作物生长发育的 2 个主要因素, 合理的灌水施氮对提高水肥资源利用和保证小麦高产稳产具有重要意义。本研究通过灌水施氮的大田试验,

收稿日期: 2016-06-12 修订日期: 2016-12-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA102904); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-1); 高等学校学科创新引智计划(111 计划)资助项目(B12007)

作者简介: 李正鹏, 男, 山东聊城人, 博士生, 主要研究方向为农业生态系统模拟研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: lipengzheng131@163.com

*通信作者: 冯浩, 男, 陕西延安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水土资源高效利用研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: nercwsi@vip.sina.com

采用修正的 Logistic 和 Richards 数学模型定量分析不同灌水施氮处理对 LAI 和株高的动态发育的影响, 同时分析 LAI 和株高动态变化过程与产量及产量构成的回归关系, 以期揭示水肥对作物生长过程和产量形成提供理论依据, 为合理调控作物群体结构提供技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验地及试验设计

试验于 2011 年 10 月开始至 2014 年 10 月结束, 试验在陕西杨凌西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室灌溉试验站 (108°05'E, 34°24'N) 内进行。该区属于暖温带季风半湿润气候区, 土壤为粉砂质黏壤土, 试验前 0~20 cm 耕层土壤凋萎含水量、田间持水量和饱和含水量分别为 0.15、0.33 和 0.46 cm³/cm³, 有机质 11.17 g/kg、全氮 0.95 g/kg、速效磷 13.67 mg/kg 和速效钾 183.20 mg/kg。

该试验采用两因素的裂区设计, 其中灌水处理为主区, 设 3 个水平, 分别为不灌水 (I0)、灌拔节水 46 mm (I1)、灌越冬水和拔节水各 46 mm (I2)。施氮为副区, 设 4 个水平, 分别为 0、105、210 和 315 kg/hm², 分别计为 N0、N1、N2 和 N3。所有氮肥均按基追比 7: 3 施入土壤, 追肥在小麦拔节期进行。于试验开始前和玉米收获后结合耕地施入基肥, 各小区施入足量的磷肥和钾肥, 分别为 165 和 90 kg/hm²。供试冬小麦品种为小偃 22, 播种于 10 月上旬进行, 人工条播。在作物生长季控制杂草和病虫害, 其他管理措施同当地农民栽培习惯一致。

1.2 测定项目和方法

本研究选取记录较详细的 2012—2013 年和 2013—2014 年小麦季数据进行分析。LAI 和株高主要是在小麦起身期、拔节开始、拔节中期、抽穗期、灌浆期、灌浆后期、收获期测定。LAI 的测定采用英国 Delta T 仪器公司生产的 SunScan 冠层分析仪。本研究中株高指的是植株基部到最上部心叶的距离, 用直尺测定。关于产量的测定方法、积温的计算参考文献[11]。为了简洁, 下文以 2013 和 2014 年分别代表 2012—2013 和 2013—2014 小麦季。

1.3 修正的 Logistic 方程

Logistic 方程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^[12]。该方程可用于定量描述作物的干物质质量积累、株高和叶面积的扩展等方面^[13-14]。作物 LAI 随生育期的变化, 前期符合 Logistic 模型, 后期由于衰老, LAI 开始下降。针对作物某些指标的生长存在下降过程这一特点, 王信理^[6]提出了修正的 Logistic 模型, 其具体方程形式如下

$$y = a / (1 + \exp(bx^2 + cx + d)) \quad (1)$$

式中 y 代表 LAI; x 代表积温, °C·d, a 、 b 、 c 、 d 均为方程参数, 其中参数 a 不再具有最大 LAI 的意义, 对公式 (1) 求导, 得到 LAI 变化的速率方程 y'

$$y' = \frac{-a \exp(bx^2 + cx + d)(c + 2bx)}{(\exp(bx^2 + cx + d) + 1)^2} \quad (2)$$

根据公式 (1) 和 (2), 可以推导出 LAI 动态变化的一些特征量。令公式 (2) 等于零, 解方程得到达到最大 LAI 时所需的积温 Lx_{max} , 代入公式 1 得到此时的最大 LAI 值 LAI_{max} 。小麦在越冬期以前主要是长根和进行分蘖, 返青后叶片才开始快速扩展伸长, 关中小麦返青一般是在 2 月下旬—3 月上旬。根据毛振强等^[15]的研究结果小麦进入返青时所需积温在 700~900 范围内, 本研究对公式 (1) 在 700 积温到成熟期范围内积分并平均, 得到小麦整个生育期的平均 LAI 值 LAI_{avg} 。对公式 (2) 求导, 得到 LAI 变化的加速度方程, 令其等于 0, 在积温 700 到 Lx_{max} 区间求数值解, 得到 LAI 达到最大扩展速率时的积温 Lx_{inf} , 代入公式 (2), 求得 LAI 最大扩展速率 LR_{max} 。综上, LAI 生长过程的特征量有最大 LAI、达到最大 LAI 时的积温、平均 LAI、LAI 最大扩展速率、达到最大扩展速率时积温, 分别记为 LAI_{max} 、 Lx_{max} 、 LAI_{avg} 、 LR_{max} 、 Lx_{inf} 。

1.4 Richards 方程

株高的动态生长过程与干物质积累过程类似, 因此本研究采用 Richards 方程描述株高和积温的生长关系, 方程的基本形式为

$$y = a' / (1 + e^{b' - c'x})^{1/d'} \quad (3)$$

式中 y 代表株高, cm; x 代表积温, °C·d, a' 、 b' 、 c' 、 d' 均为参数。关于其过程特征量的推导参考文献[11]。株高生长的特征量有最大株高、最大株高时的积温、株高伸展的最大速率、最大速率时的积温、进入快速生长期的积温, 分别记为 H_{max} 、 Hx_{max} 、 HR_{max} 、 Hx_{inf} 、 Hx_1 。

1.5 LAI、株高和产量及产量构成的关系

本研究采用逐步线性回归法, 分析产量和产量构成与冬小麦 LAI、株高的动态过程的关系。产量、每平方米粒数、千粒质量分别与 LAI 动态过程的 5 个特征量和株高动态过程的 5 个特征量进行逐步回归分析。

1.6 数据统计分析

试验测得的 LAI 和积温数据采用修正的 Logistic 曲线拟合, 株高和积温数据采用 Richards 曲线拟合, 所有拟合过程在 Origin 8.0 软件中进行, 采用相关系数 (r)、均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和标准化的均方根误差 (normalized root mean squared error, nRMSE) 对方程的拟合效果进行评估, 其计算公式如下

$$r = \frac{\sum(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum(O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum(S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - S_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\bar{O}} \times 100 \quad (6)$$

相关系数 r 越接近于 1, RMSE 越小, 方程拟合效果越好。根据 Bannayan 等^[16]对模型的评估标准对方程拟合效果进行评估。具体标准为: $nRMSE < 10\%$, 模型表现极好, $10\% < nRMSE < 20\%$ 表现好, $20\% < nRMSE < 30\%$ 表现一般, $nRMSE > 30\%$ 表现很差。

对方程拟合效果进行评估后，通过 matlab 7.0 求解株高和 LAI 动态过程的特征参数，采用考虑参数相关性的多元方差分析 (MANOVA) 方法^[17]分析灌水施氮管理对 LAI 和株高动态过程的影响。多元方差分析和逐步回归分析均在 SPSS 20.0 软件中完成。

2 结果和分析

2.1 方程拟合效果评估

利用修正的 Logistic 方程拟合两年各处理的 LAI 值，决定系数 R^2 在 0.80~0.98 范围内变化 ($P<0.01$)。由表 1 可以看出，修正的 Logistic 方程的参数 a 的变化范围最

大，CV 值达到 3.0，参数 d 的变化最小，CV 值为 0.3。Richards 方程对株高生长过程拟合的决定系数 R^2 在 0.96~1.0 范围内变化，拟合方程均在 0.01 水平上显著。Richards 方程中参数 d' 、 b' 和 c' 变化较大，CV 值分别为 0.7、0.6 和 0.6，其中参数 a' 的变异最小，CV 为 0.1。由图 1 可以看出模拟和实测的 LAI 和株高较均匀地分布在 1:1 线附近，其中模拟与实测 LAI 的 r 、RMSE 和 nRMSE 分别为 0.990、0.22 和 8%，模拟和实测株高的 r 、RMSE 和 nRMSE 分别为 0.996、2 cm 和 4%。修正的 Logistic 和 Richards 方程对 LAI 和株高的模拟均达到极好的水平，可以进一步分析不同水氮管理对 LAI 和株高生长过程的影响。

表 1 冬小麦 LAI 变化过程的修正 Logistic 方程参数和株高变化过程的 Richards 方程参数
Table 1 Fitting parameters of modified Logistic and Richards equations for LAI and plant height dynamics

年份 Year	处理 Treatment	修正 Logistic 方程参数 Parameters of modified Logistic equation				R^2	Richards 方程参数 Parameters of Richards equation				R^2
		a	b	c	d		a'	b'	c'	d'	
2013	I0N0	3 330	0.000 002	-0.005	12	0.92	56	30	0.023	8.0	0.98
	I0N1	1 236	0.000 002	-0.005	10	0.90	57	36	0.027	10.1	0.98
	I0N2	13 102	0.000 002	-0.005	12	0.85	60	23	0.017	6.9	0.98
	I0N3	6	0.000 002	-0.007	5	0.93	61	49	0.037	14.7	0.97
	I1N0	1 907	0.000 002	-0.006	11	0.80	56	30	0.023	7.9	0.99
	I1N1	2 172	0.000 002	-0.006	11	0.93	62	29	0.021	8.1	0.98
	I1N2	76 223	0.000 002	-0.006	15	0.95	67	17	0.013	4.7	0.98
	I1N3	1 250	0.000 002	-0.006	10	0.92	62	21	0.016	6.0	0.98
	I2N0	2 130	0.000 002	-0.005	11	0.86	58	21	0.015	5.6	0.99
	I2N1	12 602	0.000 002	-0.006	13	0.93	65	20	0.015	5.5	0.99
	I2N2	8	0.000 003	-0.008	6	0.89	69	14	0.010	4.1	0.98
	I2N3	31	0.000 002	-0.006	6	0.94	67	16	0.012	4.8	0.96
2014	I0N0	1 824	0.000 001	-0.005	11	0.92	66	14	0.011	3.4	0.99
	I0N1	10	0.000 002	-0.007	6	0.97	74	9	0.008	1.9	1.00
	I0N2	8	0.000 003	-0.009	6	0.96	75	6	0.006	1.1	1.00
	I0N3	9	0.000 002	-0.007	6	0.97	76	5	0.005	0.9	1.00
	I1N0	5 351	0.000 001	-0.005	12	0.95	66	20	0.016	5.2	1.00
	I1N1	1 103	0.000 002	-0.006	10	0.98	73	14	0.011	3.9	0.99
	I1N2	6	0.000 004	-0.013	9	0.95	73	7	0.007	1.6	1.00
	I1N3	7	0.000 004	-0.012	8	0.99	73	7	0.007	1.4	1.00
	I2N0	302	0.000 001	-0.004	9	0.95	65	30	0.023	8.2	1.00
	I2N1	5	0.000 004	-0.013	9	0.98	78	7	0.006	1.6	1.00
	I2N2	5	0.000 006	-0.020	13	0.98	79	4	0.004	0.6	0.99
	I2N3	6	0.000 005	-0.017	11	0.98	78	3	0.004	0.5	0.99
变异系数 Coefficient of variation, CV		3.0	0.5	-0.5	0.3		0.1	0.6	0.6	0.7	

注：I0、I1、I2 分别为不灌水、灌溉节水 46 mm、灌溉越冬水和拔节水各 46 mm；N0、N1、N2、N3 分别表示施氮 0、105、210、315 kg·hm⁻²。
Note: I0, I1 and I2 represent rainfed, irrigating 46 mm at jointing stage, irrigating 46 mm at wintering and jointing, respectively; N0, N1, N2 and N3 represent applied nitrogen rate 0, 105, 210 and 315 kg·hm⁻².

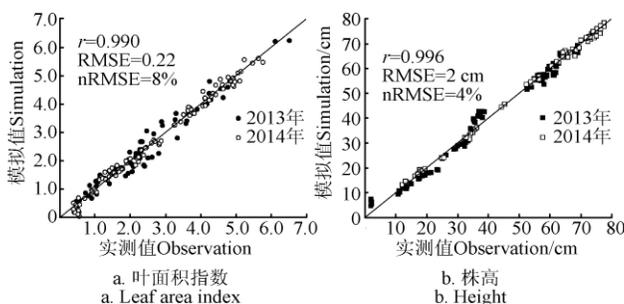


图 1 2 a 冬小麦 LAI 和株高的实测值与模拟值

Fig.1 Observed and simulated values of LAI and plant height during two experimental years

2.2 水氮管理对 LAI 动态过程的影响

关于 LAI 动态特征的多元方差分析和多重比较结果见表 2。由方差分析结果可以看出灌水对 LAI_{max}、LAI_{avg} 和 LR_{max} 有显著影响，表明灌水主要是通过影响叶面积的扩展速率来影响 LAI 动态过程。施氮对 LAI 动态过程的积温和速率特征量均有极显著影响，表明施氮可以同时调节 LAI 动态过程中的积温需求和扩展速率。年份对 L_{xinf} 和 LR_{max} 有显著影响，表明年份对 LAI 最大扩展速率的发生特征有一定的调节作用，但对最大 LAI 和平均 LAI 不产生显著影响。在本研究中灌水施氮的交互作用对 LAI 动态过程均无显著影响。由以上结果可以看出各因素对 LAI 动态过程影响强弱次序为氮肥>灌水>年份>水氮交互。

表2 不同灌水、施氮水平和年份下冬小麦 LAI 的动态特征和方差分析

Table 2 Characteristic parameters describing leaf area index dynamic process of winter wheat under different irrigation and nitrogen regimes

因素 Factors	水平 Levels	$Lx_{max}/$ ($^{\circ}C \cdot d$)	$LAI_{max}/$ ($cm^2 \cdot cm^{-2}$)	$LAI_{avg}/$ ($cm^2 \cdot cm^{-2}$)	$Lx_{inf}/$ ($^{\circ}C \cdot d$)	$LR_{max}/$ ($cm^2 \cdot cm^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1}$)
灌水 Irrigation	I0	1 627	3.50b	2.64b	1 008	0.004b
	I1	1 627	3.84ab	2.83b	1 048	0.005ab
	I2	1 615	4.11a	3.15a	976	0.006a
施氮 Nitrogen	N0	1 666a	1.87c	1.35c	1 097a	0.002c
	N1	1 626b	3.85b	2.85b	1 042ab	0.005b
	N2	1 602b	4.57a	3.47a	959bc	0.007a
	N3	1 598b	4.98a	3.82a	946c	0.007a
年份 Year	2013	1 618	3.73	2.75	1 046	0.004
	2014	1 628	3.90	3.00	976	0.006
多元 方差分析 MANOVA	灌水	Ns	*	*	Ns	*
	施氮	**	**	**	**	**
	年份	Ns	Ns	Ns	*	*
	水×氮	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns

注: I0、I1、I2 分别为不灌水、灌拔节水 46 mm、灌越冬水和拔节水各 46 mm; N0、N1、N2、N3 分别表示施氮 0、105、210、315 kg·hm⁻²; Lx_{max} 、 Lx_{inf} 分别表示达到最大 LAI 值和最大 LAI 扩展速率时的积温; LAI_{max} 、 LAI_{avg} 分别表示最大 LAI 和平均 LAI 值; LR_{max} 表示最大 LAI 扩展速率; *、** 分别表示在 0.05、0.01 水平上差异显著, 同一列中不同字母表示在 0.05 水平下有显著差, Ns 表示在 0.05 水平上差异不显著, 下同。
Note: I0, I1 and I2 represent rainfed, irrigating 46 mm at jointing stage, irrigating 46 mm at wintering and jointing, respectively; N0, N1, N2, N3 represents applied nitrogen rate 0, 105, 210 and 315 kg·hm⁻²; Lx_{max} , Lx_{inf} , thermal time required from sowing to maximum LAI and maximum growth rate of LAI; LAI_{max} , LAI_{avg} , the maximum LAI and average LAI; LR_{max} , the maximum growth rate of LAI; * and ** represent significant at the 0.05, 0.01 probability levels, respectively; Different letters within a column indicate significant differences at $P=0.05$ level; Ns, Non-significant of difference at 0.05 levels. The same below.

在 3 个灌水水平下, I2 比 I0 显著提高了 LAI 的最大扩展速率, 由不灌水下的 0.004 提高到了灌越冬和拔节水条件下的 0.006 cm²/(cm²·°C·d), 而 I1 与 I0 和 I2 均没有显著差异, 表明仅灌拔节水也能提高 LAI 最大扩展速率, 但是其效应在本研究中达不到显著水平。最大 LAI 和平均 LAI 值随着灌水次数的增加而增大, 分别由不灌水下的 3.50、2.64 cm²/cm² 增加到灌 2 水条件下的 4.11、3.15 cm²/cm² (表 2, 图 2a)。平均 LAI 值是整个冬小麦生长季 LAI 的一个平均状态, 其中包括了 LAI 的增长和下降过程。最大 LAI 在 I1 和 I2 间没有显著差别, 而平均 LAI 在 I1 和 I2 间有显著差别, 这主要是由于灌越冬水增加了前期 LAI 的扩展 (图 2a)。

在 4 个施氮水平下, LAI 最大扩展速率均随着施氮量增加而增大, N0、N1 和 N2 均有显著差异, N2 和 N3 差异不显著, 由不施氮条件下的 0.002 提高到施氮 210 kg/hm² 条件下的 0.007 cm²/(cm²·°C·d), 继续施氮没有显著提高。最大 LAI 值和平均 LAI 值在各处理下的表现同 LAI 最大扩展速率一致, 分别由不施氮条件下的 1.87、1.35 cm²/cm² 增大到施氮 210 kg/hm² 条件下的 4.57、3.82 cm²/cm² (表 1, 图 2b)。达到最大 LAI 时的积温和达到最大扩展速率时的积温均随着施氮量的增加而减少, 分别由不施氮条件下的 1 666、1 097 °C·d 缩短到施氮 315 kg/hm² 条件下的 1 598、946 °C·d。表征 LAI 动态

过程的特征量在施氮 210 和 315 kg/hm² 条件下均无显著差异, 表明在施氮 0~210 kg/hm² 范围内氮肥能加速小麦叶面积的扩展。在 2013 和 2014 年, LAI 最大扩展速率分别为 0.004 和 0.006 cm²/(cm²·°C·d), 达到此速率时的积温分别为 1 046、976 °C·d (表 1, 图 2c)。

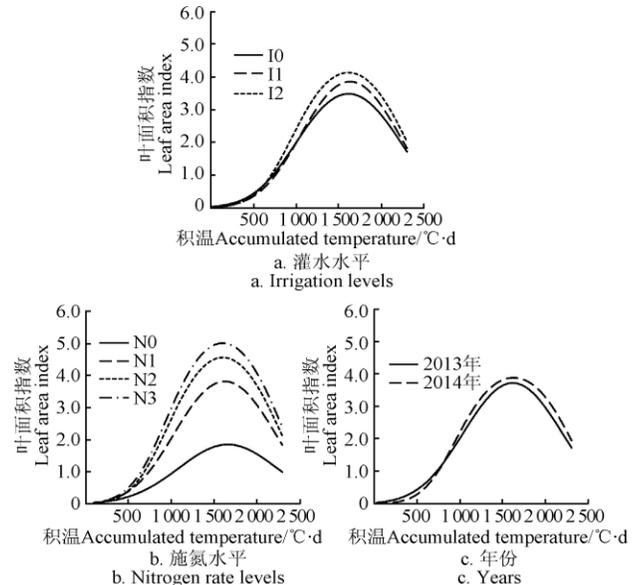


图 2 不同灌水水平、施氮水平和年份条件下 LAI 的生长变化曲线
Fig.2 Dynamic process curves of leaf area index with different irrigation amount, nitrogen application rates and different years

LAI_{max} 和 LAI_{avg} 有极强的相关性, 皮尔森相关系数达 0.993。 LAI_{avg} 、 LAI_{max} 与其他动态生长过程特征量的逐步回归方程分别为: $LAI_{avg}=348LR_{max}+1.1$, $R^2=0.78$; $LAI_{max}=422LR_{max}+1.68$, $R^2=0.71$ 。表明仅 LAI 的最大扩展速率 (LR_{max}) 显著影响 LAI_{max} 和 LAI_{avg} , 分别解释了最大 LAI 和平均 LAI 变异的 71% 和 78%。

2.3 水氮管理对株高动态过程的影响

冬小麦株高的方差分析及多重比较结果见表 3。结果表明灌水对 Hx_{max} 和 H_{max} 有显著影响, 表明灌水主要是通过影响株高的生长时间来影响最大株高。施氮除了对 Hx_{max} 和 H_{max} 有显著影响外, 还对 Hx_1 有显著影响, 表明施氮主要是通过控制株高的生长时间和快速生长期的时间来影响最大株高。年份除了对 Hx_{max} 、 H_{max} 、 Hx_1 有显著影响外, 还对 Hx_{inf} 有显著影响, 表明年份能够影响株高生长过程的所有积温变量从而影响最大株高。水氮的交互作用对株高的整个生长过程均没有显著影响。由以上结果可以看出, 影响株高生长过程的因素依次为年份 > 施氮 > 灌水 > 水氮交互。

最大株高随着灌水次数的增加而增大, 其中 I2 处理显著大于 I0 和 I1 处理, 由不灌水条件下的 62 cm 提高到灌越冬和拔节水条件下的 66 cm, I0 和 I1 处理没有显著差异 (表 3, 图 3a)。达到最大株高时的积温, I2 和 I1 处理有显著差异, 由仅灌拔节水下的 1425 °C·d 提高到灌越冬和拔节水条件下的 1505 °C·d, 表明越冬期灌水能显著延长株高的生长时间, 进而显著提高冬小麦的最大株高。

表 3 不同灌水、施氮水平和年份下冬小麦株高的动态特征和方差分析

Table 3 Characteristic parameters describing plant height dynamic process of winter wheat under different irrigation and nitrogen regimes

因素 Factors	水平 Levels	$Hx_{max}/$ ($^{\circ}C \cdot d$)	$H_{max}/$ cm	$Hx_{inf}/$ ($^{\circ}C \cdot d$)	$HR_{max}/$ ($cm^2 \cdot cm^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1} \cdot d^{-1}$)	$Hx_1/$ ($^{\circ}C \cdot d$)
灌水 Irrigation	I0	1 441ab	62b	1 159	0.107	996
	I1	1 425b	63b	1 171	0.108	1 013
	I2	1 505a	66a	1 148	0.102	956
施氮 Nitrogen	N0	1 392c	58b	1 218	0.11	1 092a
	N1	1 433bc	65a	1 177	0.108	1 010ab
	N2	1 513a	67a	1 122	0.1	920b
	N3	1 490ab	66a	1 120	0.104	932b
年份 Year	2013	1 416	59	1 245	0.104 4	1 113
	2014	1 498	69	1 074	0.106 7	864
多元方差 分析 MANOVA	灌水 Irr.	*	*	Ns	Ns	Ns
	施氮 Nit.	*	**	Ns	Ns	*
	年份 Year	**	**	**	NS	**
	水*氮 Irr.*Nit.	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns

注： Hx_{max} 、 Hx_{inf} 、 Hx_1 分别表示达到最大株高、达到最大株高扩展速率、进入快速生长时的积温； H_{max} 和 HR_{max} 分别表示最大株高和最大株高扩展速率。

Note: Hx_{max} , Hx_{inf} and Hx_1 represent thermal time required from sowing to maximum plant height, maximum growth rate of plant height and rapid growth stage, respectively; H_{max} and HR_{max} represent the maximum plant height and the maximum growth rate of plant height, respectively.

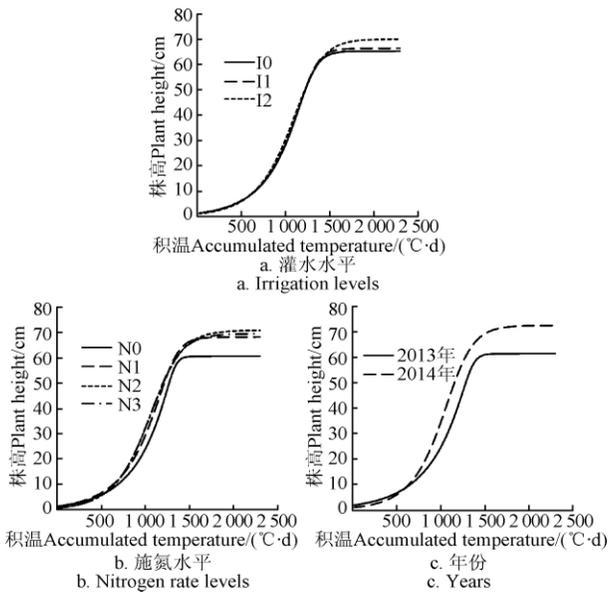


图 3 不同灌水水平、施氮水平和年份条件下株高的生长变化曲线

Fig.3 Dynamic process curves of plant height with different irrigation amount, different nitrogen application rates in different years

最大株高随着施氮量的增加而增大，其中 N0 处理与 N1、N2、N3 均有显著差异，而 N1、N2 和 N3 之间差异不显著，由不施氮下的 58 cm 提高到施氮条件下的 65~67 cm (表 2, 图 3b)。达到最大株高时的积温，N2 处理比 N0 和 N1 有明显延长，由不施氮下的 1 392 $^{\circ}C \cdot d$ 延长到施氮 210 kg/hm^2 下的 1513 $^{\circ}C \cdot d$ ，表明在适量施氮条件下氮肥能延长株高生长的时间，而施氮量过多反而可能

对株高生长时间有缩短作用，施氮 315 kg/hm^2 条件下达到最大株高时的积温为 1 490 $^{\circ}C \cdot d$ ，但与 N2 处理无显著差异。施氮能缩短株高进入快速生长期的时间，由不施氮下的 1 092 $^{\circ}C \cdot d$ 提高到施氮 210 kg/hm^2 下的 920 $^{\circ}C \cdot d$ 。

年份除对株高生长的最大速率没有显著影响外，对其他各个特征量均有显著影响 (表 2)。2013 年气象条件下株高进入快速生长期的时间、达到最大速率的时间均比 2014 年晚，而达到最大株高的时间则比 2014 年提前，导致 2013 年的株高 (59 cm) 明显低于 2014 年 (69 cm) (图 3c)。

最大株高与株高生长过程的动态特征量的逐步回归方程为： $H_{max} = -0.19Hx_1 + 0.22Hx_{inf} + 378HR_{max} - 44.21$ ， $R^2 = 0.96$ 。 Hx_1 、 Hx_{inf} 和 HR_{max} 的标准回归系数分别为 -4.47、3.26 和 0.39，表明对于最大株高变异的贡献大小依次为 $Hx_1 > Hx_{inf} > HR_{max}$ 。株高进入快速生长期时的积温 (Hx_1) 对最大株高的影响最大，解释了其变异的 55%，进入株高快速生长期的时间越早，株高越大。其次为达到最大生长速率的积温 (Hx_{inf})，解释了最大株高变异的 40%，表明达到最大速率的时间越晚，株高越大。最后是最大生长速率 (HR_{max})，其解释了株高变异的 5%。对最大株高的起决定性作用的是株高早期生长过程的积温变量。

2.4 株高、LAI 与产量及其构成的关系

采用逐步回归法分析产量、每平方米粒数、千粒质量与株高和 LAI 动态过程特征量的关系，结果见表 4。产量与株高和 LAI 的动态过程特征变量的逐步回归分析结果表明， LAI_{avg} 和 H_{max} 对产量有显著影响，回归关系解释了产量变异的 89%， LAI_{avg} 和 H_{max} 的标准回归系数分别为 0.67 和 0.37，表明平均 LAI 对产量的影响大于最大株高对产量的影响。每平方米粒数仅与 LAI_{avg} 相关，解释了每平方米粒数变异的 89%。 LAI_{avg} 和 H_{max} 的回归关系解释了千粒质量变异的 66%， H_{max} 和 LAI_{avg} 的标准回归系数分别为 1 和 -0.45，表明最大株高对千粒质量的影响更大，而且千粒质量随 LAI_{avg} 的减小有增大的趋势。本研究表明通过增大最大株高，可以增大千粒质量，增大平均 LAI 可以增加每平方米粒数，对最终产量的影响平均 LAI 大于最大株高。所得回归方程在自变量 H_{max} 取值为 53~75 cm， LAI_{avg} 取值为 1.1~4.8 范围内有效，当 H_{max} 和 LAI_{avg} 的取值范围继续增大或减小，方程的有效性需要进一步验证。

表 4 产量及其构成要素与株高和叶面积动态过程的回归关系
Table 4 Regression equations for yield and yield component with characteristic parameters of plant height and leaf area index of winter wheat

因变量 Dependent variables	逐步回归方程 Stepwise regression equation	R^2	标准回归系数 Standardized coefficients	
			LAI_{avg}	H_{max}
产量 Yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	$Y_1 = 854 LAI_{avg} + 70 H_{max} - 925$	0.89	0.67	0.37
每平方米粒数 Grain number ($seeds \cdot m^{-2}$)	$Y_2 = 2 670 LAI_{avg} + 6 928$	0.89	0.95	
千粒质量 1 000-grain weight/g	$Y_3 = 0.45 H_{max} - 1.36 LAI_{avg} + 16$	0.66	-0.45	1

3 讨论

LAI 和株高是表征作物冠层结构的重要指标,主要通过影响光能分布、光能截获和光能利用对生物量和产量产生影响。LAI 随着小麦的生长发育呈单峰变化,先逐渐增大后逐渐减小,而株高生长呈 S 型变化,逐渐增大后基本不变,其变化过程受到各种自然和人为因素的影响。

3.1 灌水对 LAI、株高的影响

适宜的水分供应是促进作物高产高效的重要途径。大量研究表明灌水能增大 LAI,延缓叶片衰老,增加叶面积持续时间^[18-22]。Jiang 等^[19]在西北春麦区的试验表明按 100% ET (潜在蒸散量) 灌水处理的 LAI 最大,且在灌浆期维持了一个较高的 LAI 值。Bouthiba 等^[20]在阿尔及利亚的半干旱区研究表明灌水可以明显延缓小麦叶片衰老,不灌水、早期灌水、后期灌水和充分灌水处理的叶片开始衰老的时间分别为播后 100、120、140 和 140 d,叶面积持续时间明显延长。本研究结果表明灌 2 水明显提高了最大 LAI 和平均 LAI,但灌水对平均 LAI 的增大主要是通过前期 LAI 扩展速率的增大,对叶片衰老过程影响不大。这可能是由于本研究中的灌水时间均在冬小麦生长前期(越冬和拔节),对 LAI 的扩展过程影响较大,至灌浆期各处理的水分条件差别不大,从而对叶片衰老过程影响较小。

大量研究表明早期亏水对株高的降低作用较大^[23-25]。吴立峰^[23]在甘肃的春小麦试验表明拔节和抽穗不灌水对株高有明显的抑制作用,而灌浆期不灌水影响不大。王翔翔^[24]在渭北旱塬的试验表明不灌水处理株高发育不良,成熟早,发育期提前,株高随着补充灌水量的增加而增大。本研究中灌越冬水和拔节水处理的株高明显大于仅灌拔节水和不灌水处理,这可能由于越冬期灌水为早期冬小麦生长创造了适宜的水分条件,促进了株高的生长。

3.2 施氮对 LAI、株高的影响

合理施氮能增产增效,降低环境危害。大量研究表明施氮能促进 LAI 增长,提高叶片光合速率^[26-28]。本研究结果表明施氮能增大 LAI,这可能是由于增施氮肥使叶片阻力降低,气孔导度增加,酶活性提高,从而光合速率增大,干物质质量增加,叶片干物质增加,而对比叶面积影响不大,从而促进 LAI 的增大^[26];随着施氮量增加,最大 LAI 先增大后不变,施氮 210 和 315 kg/hm² 处理无显著差异。Mimbe 等^[27]表明供氮不足会降低 LAI。本研究中施氮缩短了 LAI 达到最大速率的时间 (Lx_{inf}) 和达到最大值的时间 (Lx_{max}),同时提高了 LAI 的最大速率 (LR_{max}),李国强等^[28]也得出相似结果。

施氮能促进小麦株高的生长^[9,23,25]。本研究中随施氮量增加株高先增加后不变,施氮 105、210 和 315 kg/hm² 条件下最大株高无显著差异,施氮缩短了株高进入快速生长期的时间 (Hx_1),延长了达到最大株高的时间 (Hx_{max})。

3.3 水氮交互作用对 LAI、株高的影响

水肥之间存在交互作用已经成为一个共识,但是灌水与施氮的交互作用是否显著则受多因素的影响。施氮

的效应受土壤基础地力的影响,土壤地力越高,则施氮效应越弱;而灌水的效应则受底墒、降水量和分布的影响,底墒足、降水量大和降水量分布合理,则灌水的效应变弱^[29-30]。吴立峰^[23]在甘肃河西地区的试验表明灌水施氮的交互作用对小麦的 LAI 和株高均存在显著影响,该区小麦季平均降水量为 79 mm,且土壤主要为轻砂壤土。王秀康^[31]在陕西渭北旱塬的试验表明灌水施氮交互作用对春玉米的株高影响不显著,仅在成熟期对玉米叶面积存在显著影响。本研究中灌水施氮交互作用均对冬小麦的株高和 LAI 无显著影响,这可能是由于补充灌溉水平间差异较小,试验年份降水较丰沛所导致。

3.4 LAI、株高和产量的关系

植物的生长性状与最终的产量形成之间有密切的关联。叶片是小麦主要的光合器官,LAI 是影响植物冠层光合截获和利用的最大因素。Zhao 等^[18]表明随着 LAI 增大,小麦群体透光率递减,光能截获量增大;董树亭^[32]表明随着 LAI 增大,小麦群体光合速率呈米氏变化,所以 LAI 增大同时增大了光能截获和光合速率,从而形成更多的干物质。Mimbe 等^[27]表明 LAI 与穗粒数正相关,粒数对产量的贡献大于粒重对产量的贡献。本研究结果表明每平米粒数主要由平均 LAI 决定,且平均 LAI 对产量的贡献率更高。Siddique 等^[33]表明小麦的矮化在一定程度上可以形成更多的可育小穗,暗示可能茎与穗数存在一定的竞争关系,而本研究每平方米粒数与株高无关,需要进一步研究。株高是小麦重要的形态性状之一,与植株冠层分布、抗倒伏及冠层温度有较大的关系。李国强^[9]表明株高与千粒质量相关性 (0.86) 大于与穗粒数 (0.65) 的相关性。贾继增^[34]表明千粒质量与株高呈显著正相关,可能由于穗下节间长在起主要作用。本研究也表明株高越高,千粒质量越大,但同时平均 LAI 越大,千粒质量越低。这可能是由于平均 LAI 越大,干物质质量积累(源)越多,可形成的每平方米粒数(库)越多,库的增加量大于源的增加量,从而导致单粒质量下降。

4 结论

本研究通过在关中平原冬小麦的灌水施氮试验探究了叶面积指数和株高生长的动态变化过程,并进一步分析了叶面积指数和株高的动态特征与产量和产量构成的关系,所得结论如下:

- 1) 修正的 Logistic 方程和 Richards 方程均可以较为准确地模拟叶面积指数和株高的生长过程。
- 2) 灌水主要是通过提高叶面积指数的扩展速率来增大叶面积指数,通过延长株高的生长时间来增大株高。
- 3) 施氮主要通过调节叶面积指数生长的积温变量和扩展速率来增大叶面积指数,通过调节株高生长的积温变量来增大株高。
- 4) 产量与株高、叶面积指数过程的逐步回归分析表明每平方米粒数与平均叶面积指数呈显著正相关,千粒质量与最大株高呈显著正相关,其中平均叶面积指数对产量的决定作用更大。

[参 考 文 献]

- [1] Watson D J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. *Annals of Botany*, 1947(1): 41—76.
- [2] 刘宾, 赵亮, 张坤普, 等. 小麦株高发育动态 QTL 定位[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(22): 4562—4570.
Liu Bin, Zhao Liang, Zhang Kunpu, et al. Genetic dissection of plant height at different growth stages in common wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(22): 4562—4570. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴立峰, 张富仓, 王海东, 等. 新疆棉花亏缺灌溉叶面积指数模拟研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 249—258.
Wu Lifeng, Zhang Fucang, Wang Haidong, et al. Simulation of cotton leaf area index under deficit irrigation in Xinjiang[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 249—258. (in Chinese with English abstract)
- [4] Setiyono T D, Weiss A, Specht J E, et al. Leaf area index simulation in soybean grown under near-optimal conditions[J]. *Field Crops Research*, 2008, 108(1): 82—92.
- [5] Hammer G L, Carberry P S, Muchow R C. Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamics in grain sorghum. I. Whole plant level[J]. *Field Crops Research*, 1993(33): 293—310.
- [6] 王信理. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. *农业气象*, 1986, 7(1): 14—19.
Wang Xinli. How to use logistic equation in dynamic simulation of dry matter production[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1986, 7(1): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [7] 于强, 傅抱璞, 姚克敏. 水稻叶面积指数的普适增长模型[J]. *中国农业气象*, 1995, 16(2): 6—8.
Yu Qiang, Fu Baopu, Yao Kemin. The genetic growth model of leaf area index of rice[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1995, 16(2): 6—8. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物高产群体 LAI 动态模拟模型的建立与检验[J]. *作物学报*, 2007, 33(4): 612—619.
Zhang Bin, Zhao Ming, Dong Zhiqiang, et al. Establishment and test of LAI dynamic simulation model for high yield population[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 612—619. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李国强. 小麦株型建成及氮素调控研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
Li Guoqiang. Plant Type Characteristics in Wheat and Its Nitrogen Regulation Approach[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [10] Richards F. A flexible growth function for empirical use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, 10(2): 290—301.
- [11] 宋明丹, 李正鹏, 冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 119—126.
Song Mingdan, Li Zhengpeng, Feng Hao. Effects of irrigation and nitrogen regimes on dry matter dynamic accumulation and yield of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(2): 119—120. (in Chinese with English abstract)
- [12] Sepaskhah A R, Fahandezh-Saadi 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.
- [13] 赵姣, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 300—308.
Zhao Jiao, Zheng Zhifang, Fang Yanru, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 300—308. (in Chinese with English abstract)
- [14] Yan D C, Zhu Y, Wang S H, et al. A quantitative knowledge-based model for designing suitable growth dynamics in rice[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(2): 93—105.
- [15] 毛振强, 宇振荣, 刘洪. 冬小麦及其叶片发育积温需求研究[J]. *中国农业大学学报*, 2002, 7(5): 14—19.
Mao Zhenqiang, Yu Zhenrong, Liu Hong. Experimental research on thermal requirement for winter wheat and its leaves[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(5): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
- [17] Keuls M, Garretsen F. Statistical analysis of growth curves in plant breeding[J]. *Euphytica*, 1982, 31(1): 51—64.
- [18] Zhao D, Shen J, Lang K, et al. Effects of irrigation and wide-precision planting on water use, radiation interception, and grain yield of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 118(2): 87—92.
- [19] Jiang J, Huo Z, Feng S, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on spring wheat growth and yield in arid Northwest China[J]. *Journal of Arid Land*, 2013, 5(2): 143—154.
- [20] Bouthiba A, Debaeke P, Hamoudi S A. Varietal differences in the response of durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) to irrigation strategies in a semi-arid region of Algeria[J]. *Irrigation Science*, 2008, 26(3): 239—251.
- [21] 郭增江, 于振文, 石玉, 等. 不同土层测墒补灌对小麦旗叶光合特性和干物质积累与分配的影响[J]. *作物学报*, 2014(4): 731—738.
Guo Zengjiang, Yu Zhenwen, Shi Yu, et al. Photosynthesis characteristics of flag leaf and dry matter accumulation and allocation in winter wheat under supplemental irrigation after measuring moisture content in different soil layers[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014(4): 731—738. (in Chinese with English abstract)
- [22] 房全孝, 陈雨海, 李全起, 等. 灌溉对冬小麦灌浆期光合产物供应和转化及有关酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2004(11): 1113—1118.
Fang Quanxiao, Chen Yuhai, Li Quanqi, et al. Effects of irrigation on photosynthate supply and conversion and related enzymes activity during grain filling period[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2004(11): 1113—1118. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴立峰. 不同灌水和施氮对河西地区春小麦生长和水分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
Wu Lifeng. Effects of Different Irrigation and Nitrogen Application on Growth and Water Utilization of Spring Wheat in Hexi Oasis[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王翔翔. 渭北旱塬作物生长特征及其管理模式研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院, 2015.
Wang Xiangxiang. Study of Crop Growth Characteristics and Management Mode of Weibei Dryland on the Loess Plateau[D]. Yangling: The University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(12): 36—40. (in Chinese with English abstract)
- [26] Fois S, Motzo R, Giunta F. The effect of nitrogenous fertiliser application on leaf traits in durum wheat in relation to grain yield and development[J]. *Field Crops Research*, 2009, 110(1): 69—75.

- [27] Mimbe J N, Lafarge M. Nitrogen and reduced irradiance effects on ear fertility in winter-wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995, 4(1): 135–142.
- [28] 李国强, 汤亮, 张文字, 等. 施氮量对不同株型小麦品种叶型垂直分布特征的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(1): 127–137. Li Guoqiang, Tang Liang, Zhang Wenyu, et al. Effect of nitrogen rate on vertical distribution characteristics of leaf-type in wheat with different plant types[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(1): 127–137. (in Chinese with English abstract)
- [29] 高亚军, 李生秀. 北方旱区农田水肥效应分析[J]. *中国工程科学*, 2002, 4(7): 74–79. Gao Yajun, Li Shengxiu. Analysis of the effect of water and fertilizer on crop production in farmland of arid zone in northern China[J]. *Engineering Science*, 2002, 4(7): 74–79. (in Chinese with English abstract)
- [30] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 220–224. Yu Yajun, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Research progress of water and fertilizer coupling on dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(3): 220–224. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王秀康. 黄土塬区水肥供应和覆膜对玉米生长和氮素吸收的影响[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院, 2014. Wang Xiukang. Effects of Irrigation, Fertilization and Mulching on Maize Growth and Nitrogen Absorption in the Loess Plateau[D]. Yangling: The University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [32] 董树亭. 高产冬小麦群体光合能力与产量关系的研究[J]. *作物学报*, 1991(6): 461–469. Dong Shuting. Studies on the relationship between canopy apparent photosynthesis and grain yield in high-yielding winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1991(6): 461–469. (in Chinese with English abstract)
- [33] Siddique K H M, Kirby E J M, Perry M W. Ear: Stem ratio in old and modern wheat varieties; relationship with improvement in number of grains per ear and yield[J]. *Field Crops Research*, 1989, 21(1): 59–78.
- [34] 贾继增. 小麦粒重与植株性状相关因素的统计分析[J]. *作物学报*, 1984, 10(3): 201–205. Jia Jizeng. The statistical analysis for correlation factors in kernel weight and plant characters in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1984, 10(3): 201–205. (in Chinese with English abstract)

Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield

Li Zhengpeng^{1,2}, Song Mingdan^{1,2}, Feng Hao^{1,2,3*}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Leaf area and plant height are 2 important characteristic parameters of canopy structure, which represent the crop vertical extension and horizontal expansion respectively and are closely related to dry matter accumulation and yield formation by influencing the interception and distribution of photosynthetic active radiation. The dynamic process of crop LAI (leaf area index) and height could be influenced by many factors, of which water and nitrogen are the two major ones limiting crop growth and development. Some researchers have analyzed the dynamic process of LAI quantitatively under high yielding conditions, however the dynamic characteristics of LAI under water and nitrogen stress are still not clear. The effect of different cultivars, cultivation practices on the plant height at maturity were studied by most former research, while less information was found about how the management practices influence the dynamic process of plant height. Therefore, this study was aimed to clarify the effects of water and nitrogen on wheat LAI and plant dynamics and to quantify the relationship of LAI and plant height with crop yield. A field experiment during 2012–2014 was conducted with 3 irrigation levels and 4 nitrogen input levels in Guanzhong Plain of Shaanxi Province, and LAIs and plant heights measured were fitted with thermal time using the modified Logistic model and Richards mathematical model, respectively. The results demonstrated that the performances of both models were pretty good with an nRMSE (normalized root mean squared error) of 8% for LAI and an nRMSE of 4% for plant height, respectively. Irrigation enhanced the maximum growth rate of LAI, which increased from 0.004 cm²/(cm²·°C·d) under rainfed condition to 0.006 cm²/(cm²·°C·d) under irrigation condition in over-wintering and jointing period. The corresponding maximum LAI and average LAI increased from 3.50 and 2.64 cm²/cm² to 4.11 and 3.15 cm²/cm², respectively. Nitrogen fertilizer application shortened the thermal time from sowing to the maximum growth rate and maximum value of LAI occurring, and improved the maximum growth rate of LAI. Hence, the maximum LAI and average LAI increased from 1.87 and 1.35 cm²/cm² with no nitrogen input to 4.57 and 3.82 cm²/cm² with 210 kg/hm² input, respectively, and no further significant increase was observed with more nitrogen input. Irrigation enhanced the maximum plant height from 62 to 66 cm, which was resulted from the longer thermal time from sowing to the maximum plant height occurring under the irrigation condition. The thermal time from sowing to the rapid growth stage and to the maximum plant height occurring was shortened and extended by nitrogen fertilizer application, respectively, which brought about a plant height increasing from 58 to 65 cm with 105 kg/hm² input, and then plant height was leveled off with more nitrogen input. Due to more rainfall in the early growth stage, the plant height in 2014 was about 10 cm higher than that in 2013. The stepwise regression analysis of dynamic characteristics of wheat yield with LAI and plant height showed that grain numbers per square meter was only related with average LAI, while 1 000-grain weight depended largely on the maximum plant height. Furthermore, the final yield was determined by both average LAI and the maximum plant height with a larger contribution from average LAI. This research revealed the mechanism that how irrigation and nitrogen fertilizer application affected the plant leaf area and height growth, and then further impacted on yield. The result provides a set of technical support for reasonable regulation of crop community structure.

Keywords: irrigation; nitrogen; plants; modified Logistic model; Richards model; yield components