

滴灌玉米叶面积指数归一化建模与特征分析

李振洲, 贺正, 贾彪*, 刘志, 付江鹏, 刘慧芳

(宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021)

摘要: 为探讨宁夏引黄灌区不同施氮量条件下滴灌玉米叶面积指数的动态变化特征, 反映温度等气象因子对宁夏玉米形态结构和生长发育的影响, 预测玉米生长过程与相对叶面积指数动态变化规律, 本研究于 2017 ~ 2018 年在宁夏平吉堡和宁夏大学试验农场进行, 以玉米天赐 19 为试验材料, 采用水肥一体化管理技术, 设 6 个氮肥水平, 对玉米全生育期叶面积指数 (LAI) 和有效积温 (GDD) 进行累积并归一化处理, 以相对有效积温为自变量和相对叶面积指数 (RLAI) 为因变量进行动态模拟, 得出了 5 个准确度较高的模型, 其中有理函数模型更符合宁夏滴灌玉米相对叶面积指数动态变化规律, 模型检验结果表明, 准确度均大于 0.933**, 精确度 R^2 均大于 0.915**; 因此, 此模型能较准确地对玉米群体 RLAI 进行动态预测; 施氮量可调控玉米的 LAI、平均叶面积指数 (MLAI) 及 $MLAI/LAI_{max}$, 为滴灌玉米叶面积指数动态模拟精度提供技术途径。

关键词: 玉米; 相对叶面积指数; 相对有效积温; 模型; 特征

叶片是作物进行光合作用的主要器官, 叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 也是作物生长监测的重要指标, 并用于代表生态系统生产力^[1-2]。在作物生产中, 理想的 LAI 是培养作物合理的群体结构和提高产量的基础^[3]。但传统测定法获取 LAI 预测作物的生长状况费时费力^[4], 仅适合表达小范围的测量信息^[5-6], 推广应用受限。作物生长模拟模型是现代信息化手段获取作物生长发育状况的重要方法, 利用叶面积估算模型是现在研究较为通用方法, 可预测作物整个生长发育进程。

农作物的叶面积动态易受光照和温度等条件影响, 作物叶面积动态随有效积温 (GDD) 的影响已有相关研究^[7]。GDD 作为作物生长的重要指标, 用积温代替时间动态更具有代表性, 更能反应玉米的生长状况^[8]。李书钦等^[9]基于有效积温构建冬小麦返青后叶长和最大叶宽动态模型, 运用 Logistic 方程模拟 LAI 动态, 可较好地预测冬小麦的生

长状态, 探讨了不同品种冬小麦在不同施氮水平下的叶片生长变化。王贺垒等^[10]建立了基于有效积温的设施茄子推导 LAI 动态模型, 修正 Logistic 方程表达式, 有效确定番茄的蒸散量。孙仕军等^[11]以有效耕层积温为自变量, 在雨养区不同覆膜下分别以 LAI 和株高为因变量建立 Logistic 模型, 研究了整个生育期内玉米主要生长性状模型。本文借鉴前人研究 LAI 模拟模型优点, 应用“归一化”方法, 以有效积温为自变量, 玉米叶面积指数为因变量, 建立不同氮 (N) 素水平滴灌玉米 LAI 模型, 分析平均叶面积指数 (MLAI) 与最大叶面积指数 (LAI_{max}) 对玉米群体生长指标的影响, 为宁夏滴灌玉米 LAI 动态模拟精度提供技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验 1 于 2017 ~ 2018 年在宁夏回族自治区平吉堡农场 (106° 01' 45" E, 38° 26' 42" N) 进行, 田间土壤类型为淡灰钙土, 肥力中等。试验 2 于 2018 年在宁夏大学教学试验农场 (38° 13' 03" N, 106° 14' 12" E) 进行, 田间土壤类型为灌淤土, 土壤肥力中等偏上。前茬作物均为玉米, 0 ~ 20 cm 土层肥力见表 1。年降水量在 200 ~ 300 mm, 太阳辐射总量 145 kJ/cm², 日照时数 3 000 h, 年平均气温 8 ~ 9℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 3 100 ~ 3 300℃ /d。

收稿日期: 2019-06-05; 录用日期: 2019-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560339); 宁夏高等学校科研项目 (NGY2017025); 宁夏自然基金项目 (2019AAC03068); 宁夏回族自治区科技重大专项 (2018BBF0200404); 宁夏区重点研发计划项目 (2018BBF02018); 国家科技支撑计划项目 (2015BAD22B01)。

作者简介: 李振洲 (1992-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为作物高产优质高效栽培。E-mail: 979577825@qq.com。

通讯作者: 贾彪, E-mail: jiabiao2008@163.com。

表1 试验地土壤肥力

试验地	年份	pH 值	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
平吉堡农场	2017	7.92	11.51	0.82	0.59	37.42	19.11	102.48
	2018	7.57	12.78	0.70	0.45	36.64	17.42	95.34
宁夏大学试验农场	2018	8.57	14.83	0.92	0.53	39.44	20.63	111.25

1.2 试验设计

试验1不同氮素处理试验(2017~2018年),分别为N0(0 kg/hm², 对照)、N1(90 kg/hm²)、N2(180 kg/hm²)、N3(270 kg/hm²)、N4(360 kg/hm²)、N5(450 kg/hm²),采用随机区组设计,玉米供试品种天赐19(TC19),生育期为137 d左右。3次重复,18个小区,小区面积为66 m²(长15 m×宽4.4 m)。采用宁夏大力推广的机械播种模式,宽窄行种植,宽行70 cm,窄行40 cm,种植密度为9×10⁴株/hm²。采用水肥一体化滴灌模式施入,分别于苗期、拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、吐丝期、籽粒建成期、乳熟期和蜡熟期随水施肥8次,随水施肥中氮肥占总氮用量分别为10%、15%、15%、15%、20%、10%、8%、7%。其他管理过程同当地高产田。2017~2018年为4月下旬播种,9月下旬收获。试验2处理同试验1。试验1数据用于模型构建,试验2数据用于模型验证。

1.3 叶面积测算与LAI归一化

各处理在苗期、拔节期、吐丝期、吐丝期后30 d、蜡熟期和成熟期取样,玉米叶面积测算为叶长×叶宽×系数,展开叶系数为0.75,未完全展开叶系数为0.50^[12]。将整个生育期LAI_{max}定为1,对生长期和LAI作归一化处理^[9]。

1.4 有效积温计算

有效积温计算需实时获取玉米整个生育期内单位时间内平均温度等气象数据,本研究气象数据来自平吉堡试验基地田间小型气象工作站。依据《作物栽培学》关于玉米的介绍,玉米各生育时期3基点温度分别为:生长的上限温度为40~44℃,生长的下限温度为8~10℃,生长的最适温度为30~32℃,关于玉米有效积温的计算参考王荣栋等^[13]的研究,宁夏地区玉米生物学零度为8℃,玉米生长的下限温度为T_{min}=8℃,生长的上限温度为T_{max}=35℃。

玉米各生长发育阶段有效积温的计算公式如下^[10]:

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{\min}) \quad (1)$$

$$T_i = \frac{T_x^* + T_n^*}{2} \quad (2)$$

式中:GDD为有效积温,T为单位时间段平均温度,一般为1 h的平均温度;T_{min}是最小值温度;T_i是平均温度;T_x^{*}是适宜最高温度;T_n^{*}是适宜最低温度。取值规则如下:

$$\begin{cases} T_x^* = T_{\max} & T_x^* \geq T_{\max} \\ T_x^* = T_{\min} & T_x^* \leq T_{\min} \\ T_x^* = T_x & T_{\min} \leq T_x^* \leq T_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_n^* = T_{\max} & T_n^* \geq T_{\max} \\ T_n^* = T_{\min} & T_n^* \leq T_{\min} \\ T_n^* = T_n & T_{\min} \leq T_n^* \leq T_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

1.5 数据处理

采用Excel 2010分析数据;利用Curve Expert 1.38软件和Origin Pro 8.5进行相对叶面积指数(RLAI)和相对有效积温(RGDD)的模拟^[11],用SPSS 17.0进行统计分析;筛选、建立具有生物学意义的RLAI动态模拟模型。

2 结果与分析

2.1 玉米叶面积指数动态变化规律

从LAI动态变化曲线可得出,N0处理由于N素供应不足,LAI在整个生育期一直低于其他处理;高N处理(N5)由于供N充足,则LAI在吐丝后30 d之前高于其他处理,之后由于营养生长过旺,与N4处理LAI差异不明显(图1)。N4和N5处理LAI在生育中后期一直保持较高值,说明施N肥可提高玉米叶面积指数。不同施N量处理玉米LAI在2年的试验中变化趋势基本相同,均为单峰曲线,在吐丝期达到峰值,平均为7.14;而在拔节期和收获期都较低,年际间LAI变化趋势基本相同,均表现为缓慢增长、快速增长和后期逐渐缓

慢下降的偏锋曲线。但不同年限、不同施 N 量玉米的 LAI_{max} 以及到达的最大时间不同, 低氮 (N1) 处理玉米在出苗后 65 d、高氮 (N4) 处理玉米在出苗 60 d 左右达到 LAI_{max} 值。若对数据运用归一化处理^[11], 将 LAI_{max} 定为 1, 用 RGDD 表示生长时期, 则可以减小或消除玉米生育期天数和不同施 N 量的差异, 数据的离散程度会降低。由此, 利用归一化

数据模拟玉米 LAI 动态变化, 建立适用与不同施 N 量处理的 LAI 模型。

从统计参数 (表 2) 来看, 不同 N 素处理玉米在吐丝期群体 LAI 变异程度较小, 即各不同施 N 量处理在不同年份间差异小。而在收获期和拔节期变异系数大, 且收获期比其他各时期都高, 达 79.81%, 不同施 N 量处理之间差异较大。

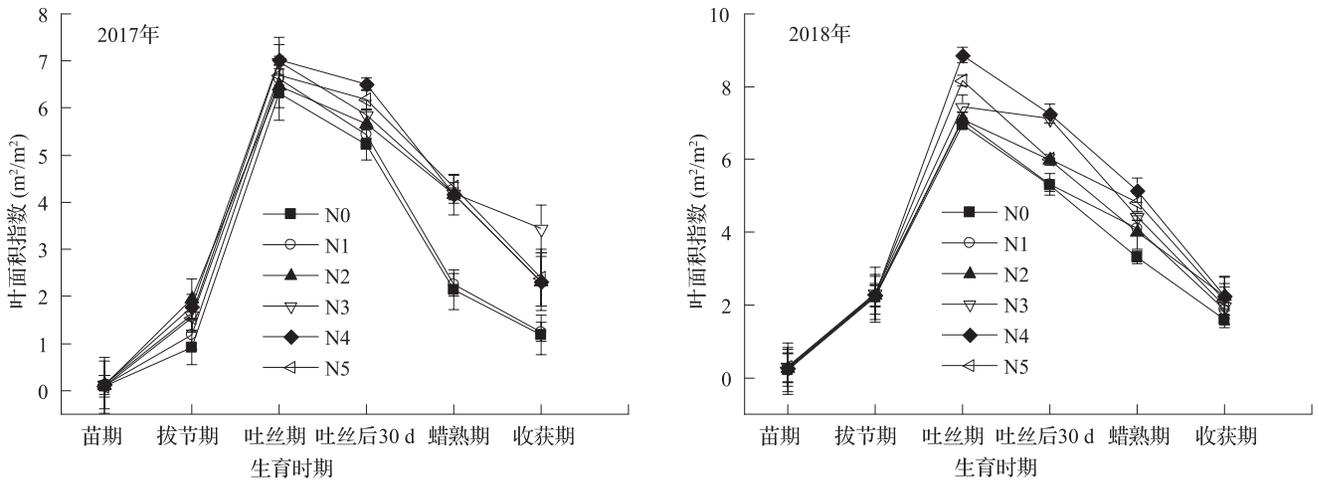


图 1 滴灌玉米 LAI 动态变化

表 2 2017 ~ 2018 年玉米不同施 N 量处理关键生育时期的叶面积指数

统计参数	苗期	拔节期	吐丝期	吐丝后 30 d	蜡熟期	收获期
均值	0.19	1.88	7.14	5.99	4.09	2.08
标准差	0.03	0.45	0.54	0.88	1.26	1.66
变异系数 CV (%)	15.79	23.94	7.56	14.69	30.81	79.81

2.2 作物相对化 LAI 动态模型的建立

对玉米从苗期到吐丝后 30 d 的 LAI 和 GDD 进行归一化处理, 用 Curve Expert 1.38 软件对 RLAI 和 RGDD 模拟, 得到有理方程、余弦曲线、logistic、MMF model 和二次函数等多个模拟方程, 取其中模拟较好的 5 个模拟方程 (表 3), 可以得出, 模型以余弦曲线、Logistic 方程和有理方程模拟较好, 各相关系数分别达到 0.981^{**}、0.976^{**}、0.982^{**}。为进一步筛选玉米的 RLAI 随 RGDD 的动态模型变化结构, 利用求极限值^[14-15]的方法分析筛选并对这 3 组模型求拟合值。

$$y = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{a}{1 + be^{-cx}} \right) = a \quad (1)$$

$$y = \lim_{x \rightarrow \infty} [a + b \cos(cx + d)] = \infty \quad (2)$$

$$y = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(\frac{a + bx}{1 + cx + dx^2} \right) = 0 \quad (3)$$

公式 (1) 和 (2) 均不能对玉米 LAI 的变化趋势作出有效的解释, 公式 (3) 中当 x=0 时, y=a, 即为玉米出苗时 RLAI 值; 当 x=1 时, y=(a+b)/(1+c+d), (a+b)/(1+c+d) 即为成熟期的玉米的 RLAI。方程只有一个峰值, 且当 x → ∞ 时, y → 0; 即说明有理方程能够对玉米生长较合理地进行解释。由此, 在多种模型筛选中, 发现有理函数模型最能反映玉米 RLAI 动态, 故选择有理方程 y=(a+bx)/(1+cx+dx²) 为不同 N 素处理玉米的生长过程。其模型参数 a 为出苗时的 RLAI 值, (a+b)/(1+c+d) 为成熟时 RLAI, 方程模拟准确度高。对应的模型方程如图 2 所示。其模型方程通式为 y=(-0.080+0.510x)/(1-2.191x+1.680x²), R²=0.982^{**}。

由 LAI 动态模型模拟的不同 N 素处理的玉米模拟值与实测值真实性较好, 能够很好地反映玉米的

表 3 玉米归一化相对叶面积指数动态共性模型

序号	模拟模型	参数				相关系数 (R ²)
		a	b	c	d	
1	$y = (a+bx) / (1+cx+dx^2)$	-0.080	0.510	-2.191	1.680	0.982**
2	$y = a+b\cos(cx+d)$	0.519	0.501	4.589	2.480	0.981**
3	$y = a / (1+be^{-cx})$	0.965	194.174	11.252		0.976**
4	$y = (ab+cx^d) / (b+x^d)$	0.056	0.014	0.980	5.772	0.973**
5	$y = a+bx+cx^2$	-0.660	3.444	-1.832		0.960**

注：模型中 x 为相对有效积温，y 为相对叶面积指数。**为显著性在 0.01 水平。

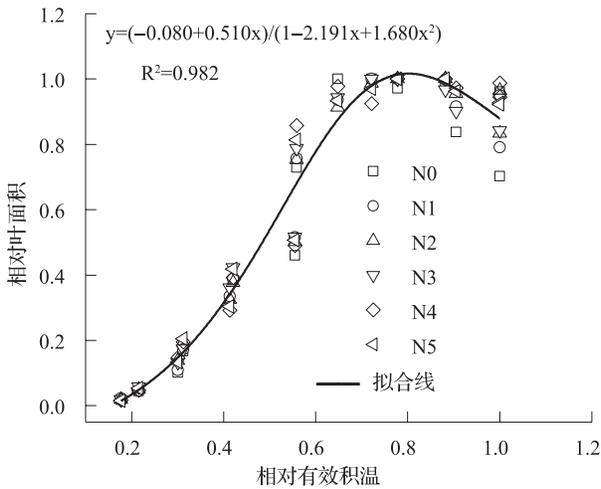


图 2 基于有理函数的玉米 RLAI 与 RGDD 动态模型曲线

LAI 动态变化，且相关系数 (R²=0.982**) 高。对宁夏地区不同 N 素处理及不同年份栽培的玉米具有通用性。

2.3 相对化 LAI 动态模拟模型的检验

采用试验 2 的玉米 LAI 测量值进行全生育期间的叶面积指数动态模拟，将得到的模拟值与实测值进行比较 (图 3)。分析图 3 得出，由 RLAI 模型模拟所得整个生育时期的模拟值与实测值比较接近真实，模拟结果的准确性 (k) 的变化范围在 0.933 ~ 1.035 之间，近似于 1，越接近于 1 则准确度越高。模拟的精确度 (R²) 在 0.972 ~ 0.974 之间。说明相对化动态模型的模拟准确度较高，模拟结果能很好地反映玉米群体 LAI 动态变化。

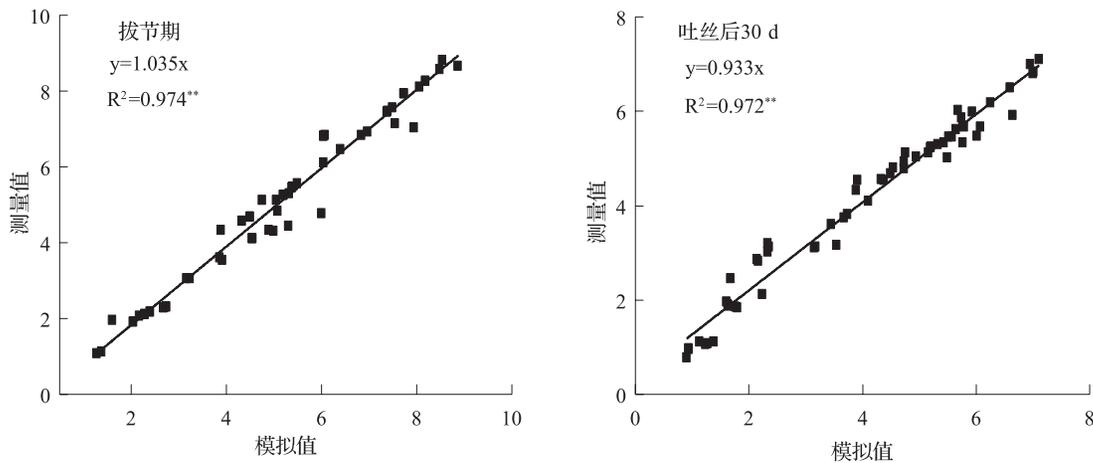


图 3 玉米模拟 LAI 值与实测 LAI 值的关系

2.4 玉米群体 RLAI/LAI_{max} 的关系

计算不同施 N 量处理的玉米平均叶面积指数 (MLAI) [11]，取 2017 和 2018 年 2 年数据 6 个不同施 N 量处理的叶面积的平均值。图 4 表明，在玉米整个生长时期，MLAI 与 MLAI 和 LAI_{max} 的比率随施 N 量的增加呈现显著性变化关系。随着生育期进程施 N 量的增加，MLAI 呈现二次函数递增

的趋势 (图 4a)，其拟合曲线方程为 $y = -0.0330x^2 + 0.0224x + 1.2126$ (R²=0.9856**); MLAI 与 LAI_{max} 的比率随着施 N 量的增加呈现二次函数递减的走势，其拟合曲线方程为 $y = 0.0003x^2 - 0.0335x + 0.6656$ (R²=0.9681**)。说明施 N 量的增加促进了玉米 MLAI 的增加，同时也限制了玉米最大生产潜力的增长。

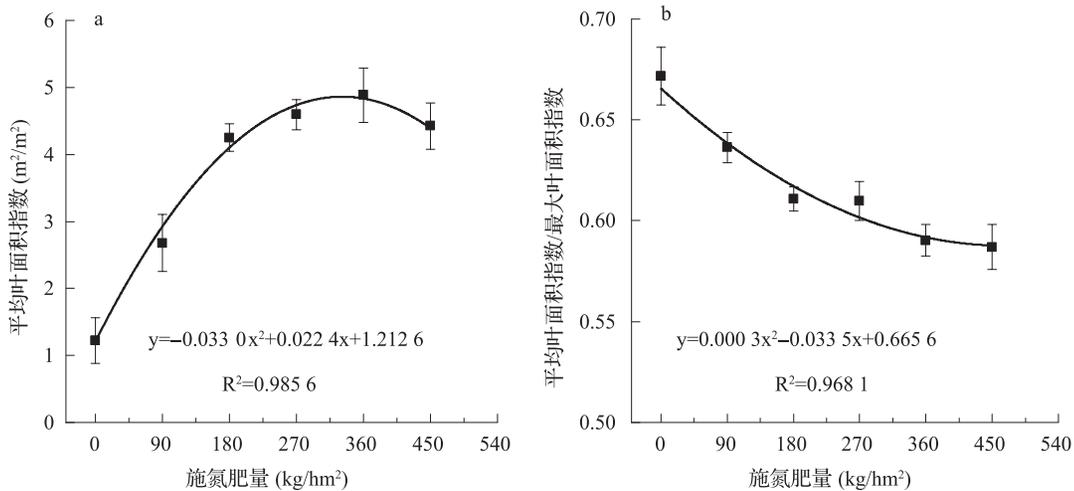


图4 不同施N量处理玉米群体MLAI及其与LAI_{max}比率的变化

3 讨论

氮素是玉米作物生长吸收最多的矿质元素，对作物器官形态建成和叶片生长速率等影响明显^[16]。叶片是光合作用的主要场所，是玉米物质生产和产量形成的基地^[17-18]。研究表明，适量施氮可有效延缓玉米叶片衰老，改善玉米叶片光合特性，从而显著增加玉米产量^[19-21]。本研究结果表明：在全生育期中，玉米群体LAI随着不同N量施肥处理呈先增加后降低的变化趋势，N0的LAI保持最低，N4最高（图1），说明过量施N导致生育后期叶片早衰，LAI降低，由此，适量施N可提高玉米群体的物质生产水平，可提高玉米群体光合性能，从而使产量达到最大，过量施N则抑制玉米实现最大生产潜力。

作物生长模拟模型的应用对于农业生产具有重要意义，其可预测作物的产量，为提高作物高产提供理论依据^[21]。张宾等^[12]运用“归一化”的方法，建立了LAI动态模拟模型，实现了模型分析作物LAI动态的普适性，但并未考虑品种的光周期和积温效应。吕新^[8]采用积温变量代替时间变量来衡量玉米生长状况比生长发育天数更直观。近年来，大量研究利用获取模型变量LAI数据来调整模型参数，减小作物模拟模型的误差，达到模型的准确实用^[22]。如将LAI数据产品同化到WOFOST (world food study) 冬小麦过程模型，优化出苗期和土壤水分含量模型参数，缩小了冬小麦估产误差^[23]。Cheng等^[24]将时间数据同化到WOFOST模型中优化LAI模型及其参数，提高了春玉米产量

估测精度。本研究基于以不同施N量调控下GDD与玉米LAI动态变化关系建立了有理函数模型（图2），其模型绝对系数达0.982，结合玉米生理生态过程，并利用此玉米LAI模型对玉米整个生育时期叶面积指数动态进行估测。本研究结果与张宾等^[12]以相对生育时间建立的玉米LAI模型相似，且能更准确地模拟宁夏滴灌玉米LAI动态变化。由此可以看出，作物生长过程模拟模型的有效应用，均需要对模型参数进行区域性调整或优化，如模型的同化方法有待深入研究^[25-27]。

LAI是反映作物整个生育时期光合性能的重要指标，直接影响着群体光合能力和经济产量的形成^[28]。LAI在一定程度上还可反映作物群体整个生育期的物质生产状况^[29]。有研究表明，在各生育时期，施N量对LAI影响显著^[30]，合理施N可以延缓花后植株叶片的衰老和脱落，延长了LAI的高值持续期^[31]。本研究中：不同施N量处理对整个玉米生育期具有明显的调控作用，LAI随施N量增加而增大；MLAI随施N量的增加呈正相关，而MLAI与最大LAI的比率则随施N量呈负相关（图4），进一步说明适量施N对提高玉米MLAI具有重要意义。本研究只在不同施N量下对玉米LAI和GDD之间的模拟模型进行验证（图3），光照和温度对玉米叶片的伸展和衰老速率影响还需进一步研究；此外，对模型求导还可计算出任意时间的LAI变化速率，LAI生长速率与土壤中的氮和碳含量有关^[32]。这也在以后的研究论文中需进一步明确完善。

4 结论

将玉米 LAI_{max} 和从出苗到收获期有效积温定为 1, 对归一化处理后 RLAI 和 RGDD 来进行模拟, 建立了 LAI 动态模型 $y = (a+bx) / (1+cx+dx^2)$, 并对模型进行检验, 结果表明此模型的准确度总体达到 0.933 以上, 精确度在 0.972 ~ 0.974 之间, 玉米 LAI 动态模型从玉米苗期就能准确地进行 LAI 动态预测, 为研究模拟宁夏玉米 LAI 的动态变化特征提供了新的思路与有效方法。整个生长过程中, 玉米 MLAI 随着施 N 量的增加呈二次函数模型的递增趋势, 但 MLAI 与 LAI_{max} 的比率随施 N 量的增加而减小, 说明了玉米施 N 量的不同对其整个生育期 LAI 具有调控作用, 这为进一步深入研究玉米增产提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李永秀, 罗卫红, 倪纪恒, 等. 基于辐射和温度热效应的温室水果黄瓜叶面积模型 [J]. 植物生态学报, 2006, (05): 861-867.
- [2] Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, et al. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121: 19-35.
- [3] 张怀志, 曹卫星, 周治国, 等. 棉花适宜叶面积指数的动态知识模型 [J]. 棉花学报, 2003, 15 (3): 151-154.
- [4] 刘谔源, 王纪华, 杨贵军, 等. 冬小麦叶面积指数地面测量方法的比较 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (03): 220-224.
- [5] Bréda N J J. Ground-based measurements of leaf area index: A review of methods, instruments and current controversies [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54: 2403-2417.
- [6] Jan C, Lammert K, Marnix VDB, et al. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop [J]. Remote Sensing, 2017, 9: 405-419.
- [7] Chen Y, Marek G W, Marek T H, et al. Improving SWAT auto-irrigation functions for simulating agricultural irrigation management using long-term lysimeter field data [J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 99, 25-38.
- [8] 吕新. 生态因素对玉米生长发育影响及气候生态模型与评价系统建立的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.
- [9] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙, 等. 基于有效积温的冬小麦返青后植株三维形态模拟 [J]. 中国农业科学, 2017, 50 (9): 1594-1605.
- [10] 王贺奎, 韩宪忠, 范凤翠, 等. 基于有效积温的设施茄子营养生长期蒸散量模拟系统 [J]. 节水灌溉, 2019, 282(02): 16-22.
- [11] 孙仕军, 姜浩, 陈志君, 等. 不同颜色地膜覆盖下春玉米主要生长性状对耕层积温的响应 [J]. 草业学报, 2019, (2): 61-72.
- [12] 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.
- [13] 王荣栋, 尹经章. 作物栽培学 [M], 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [14] 杨宁, 孙占祥, 张立桢, 等. 基于改进 AquaCrop 模型的覆膜栽培玉米水分利用过程模拟与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31 (增刊): 122-132.
- [15] 麻雪艳, 周广胜. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用 [J]. 生态学报, 2013, 33 (8): 2596-2603.
- [16] Fang X M, Li Y S, Nie J, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) [J]. Field Crops Research, 2018, 219: 160-168.
- [17] 董树亭, 高荣岐, 胡昌浩, 等. 玉米花粒期群体光合性能与高产潜力研究 [J]. 作物学报, 1997, 23: 318-325.
- [18] Lizaso J I, Batchelor W D, Westgate M E. A leaf area model to simulate cultivar-specific expansion and senescence of maize leaves [J]. Field Crops Res, 2003, 80: 1-17.
- [19] 姜涛. 氮肥运筹对夏玉米产量、品质及植株养分含量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (3): 559-565.
- [20] 宋金鑫, 谷岩, 于寒, 等. 覆膜和氮肥施用量对滴灌玉米生长发育及产量的影响 [J]. 分子植物育种, 2019, 17 (21): 7251-7255.
- [21] 杨华, 祁生林, 彭云峰. 玉米优化施氮高产高效生理机制 [J]. 农业工程, 2016, 6 (2): 109, 127-129.
- [22] Xu W J, Liu C W, Wang K R, et al. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China [J]. Field Crops Research, 2017, 212: 126-134.
- [23] Ma G, Huang J X, Wu W B, et al. Assimilation of MODIS-LAI into the WOFOST model for forecasting regional winter wheat yield [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58: 634-643.
- [24] Cheng Z Q, M J H, W Y M, et al. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time-series HJ-1 CCD data into the WOFOST model using a new method with fast algorithms [J]. Remote Sensing, 2016, 8 (4): 303-325.
- [25] 黄健熙, 黄海, 马鸿元, 等. 遥感与作物生长模型数据同化应用综述 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (21): 144-156.
- [26] 解毅, 王鹏新, 王蕾, 等. 基于作物及遥感同化模型的小麦产量估测 [J]. 农业工程学报, 2016, 32 (20): 179-186.
- [27] Li W G, Li H, Zhao L H, et al. Estimating rice yield by HJ-1A satellite images [J]. Rice Science, 2011, 18 (2): 142-147.
- [28] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应 [J]. 中国农业科学, 2012, 45 (6): 1074-1083.
- [29] 张宾, 赵明, 董志强, 等. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析 [J]. 作物学报, 2007, 33 (10): 1674-1681.
- [30] 王进斌, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥运筹对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响 [J]. 草业学报, 2019, 28 (1):

- 60-69.
- [31] 武文明, 王世济, 陈洪俭, 等. 氮肥后移促进受渍夏玉米根系形态恢复和提高花后光合性能 [J]. 中国生态农业学报, 2017, 25 (7): 1008-1015.
- [32] Hirooka Y, Homma K, Maki M, et al. Evaluation of the dynamics of the leaf area index (LAI) of rice in farmer's fields in Vientiane Province, Lao PDR [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2017, 73 (1): 16-21.

LAI normalization modeling and characteristic analysis of maize with drip irrigation

LI Zhen-zhou, HE Zheng, JIA Biao*, LIU Zhi, FU Jiang-peng, LIU Hui-fang (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In this study, the dynamic characteristics of leaf area index (LAI) of maize under drip irrigation and different nitrogen application conditions and the effects of environmental factors such as temperature on the morphological structure and growth of maize in Ningxia irrigation area were explored, the dynamic changes of corn growth process and relative LAI were predicted. The experiment was conducted in Pingjibao Farm of Ningxia and Experimental Farm of Ningxia University in 2017 ~ 2018. The Tianci 19, which is mainly planted in the irrigation area, was used as the test material. The water and fertilizer integrated management technology was used and six levels of nitrogen fertilizer were set up. The LAI and effective accumulated temperature (GDD) were normalized from the seedling stage to the 30 days after silking. With relative GDD as the independent variable and relative LAI (RLAI) as the dependent variable, five simulation models with higher accuracy were obtained. The model $y = (a + bx) / (1 + cx + dx^2)$ was more consistent with the dynamic change of RLAI of maize with drip irrigation in Ningxia. The test results of the model showed that the accuracy was greater than 0.933**, and the accuracy R^2 was greater than 0.915**. Therefore, this model can accurately predict the RLAI of corn populations. The N application amount can regulate the LAI, average LAI (MLAI) and $MLAI/LAI_{max}$ of corn, which provides an effective technical way for the in-depth study of maize yield improvement.

Key words: maize; relative leaf area index; relative effective accumulated temperature; model; characteristics