

李蕊, 郭建平. 东北春玉米积温模型的改进与比较. 应用气象学报, 2017, 28(6): 678-689.

DOI: 10.11898/1001-7313.20170604

东北春玉米积温模型的改进与比较

李蕊¹⁾ 郭建平¹⁾²⁾*

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾(南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘 要

积温是农业气象科研和业务工作中最常使用的指标之一,但由于受其他环境条件的影响,农作物生育期间的积温在年际间和地区间均表现出不稳定性。因此,如何对已有积温模型进行修正,使农作物生育期间积温计算值趋于稳定并反映实际情况,对农业生产和气象服务均有重要意义。该文以东北春玉米四单 19 为例,应用沈国权提出的非线性积温模型(简称 NLM)进行拟合,分析了参数选择对积温稳定性的影响,提出使用平均温度的二次函数对线性积温模型(简称 LM)进行修正(修正后模型称 TRM)并进行效果分析,与 NLM 进行比较。结果表明:NLM 拟合时参数 P 越小,模拟有效积温越稳定;NLM 积温在年际间、地区间均存在差异,造成积温不稳定的主要因子是温度强度,与其他因子相关性较差;有效积温与生育期平均温度呈二次曲线关系,对 LM 的温度二次方修正结果与 NLM 结果比较发现,二次方修正方法具有可行性。

关键词: 春玉米; 积温模型; 稳定性; 修正模型

引 言

温度是影响作物生长发育速度的关键因子,温度高低决定了生育期的长短^[1]。积温作为农业气象领域中常用的指标之一,许多作物生长发育模型^[2-3]及地区热量资源条件分析^[4]中均使用,该指标可以反映出不同作物及品种对热量资源的需求差异,亦可利用积温指标分析评价某一地区的热量条件是否满足作物生长发育要求,从而避免盲目引种。积温学说引入我国后,在相当长一段时间内占据主要地位,可归纳为其他条件得到满足的前提下,温度对作物生长发育起主导作用;开始发育需要一定的下限温度;且完成某一阶段的发育需要一定积温^[5]。此后,提出地积温、负积温、积寒、有害积温等^[6-9]概念,进一步丰富了积温学说。实际上作物生长发育所需要的积温并非稳定不变,可能因作物品种、地区、年

份、生育期的不同而出现波动,体现出积温的不稳定性,即积温的稳定性是相对的,从而导致积温指标的应用受到限制。因此,如何提高积温计算的稳定性和准确性,对积温概念的进一步应用具有重要意义。

环境条件尤其是温度、光周期、日照时数、太阳辐射、降水等因素会显著影响玉米的生长发育^[10-11]。温度变化会导致作物生长发育及物候现象的变化^[12]。沈国权^[13]针对温度强度对积温稳定性的影响,提出用反映某一时段平均温度的温强系数订正积温而得到当量积温,使其稳定性得以提高。但即使作物生育期平均温度相同,夜温的差异同样会造成作物发育速率的不同,夜温越高发育速度越快,有研究将夜温对积温的影响考虑在内提出夜温比较量的概念^[14]。作物各生育期所处的光照长度不同,完成某一生育期所需要的时间、积温也不相同。如短日性作物在短日照条件下发育快,在长日照条件下

2017-07-14 收到, 2017-09-19 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(31571559)

* 通信作者, email: gjp@camsma.cn

发育缓慢。土壤湿度对作物生长发育的影响规律并不十分清楚,马玉平等^[15]以华北地区夏玉米为研究对象,对几种作物发育模式(积温、发育单位、热量单位)进行稳定性比较,探讨温度强度和土壤湿度对夏玉米生育进程的影响,对原有模式进行修正,使模型的模拟能力有一定提高。此外,地理差异、栽培差异以及人为因素也会对作物生育进程和所需积温造成一定影响^[16]。灾害性天气如东北地区夏季的低温冷害、夏秋旱是影响作物生长发育相对显著的危害,作物生长发育受到一定程度的不利影响,使不同生育期积温发生显著变化,不利于作物的高产、稳产。

造成积温不稳定的原因多而复杂,如环境条件、计算方法不同等。积温模型总体上分为线性模型和非线性模型两大类,线性模型只适用于发育速度与平均温度为线性关系的情况,但实际上当温度过低或过高时发育速度与温度表现为非线性关系,不能体现出温度过高或过低情况对作物生长发育的迟滞作用,利用其进行生育期预报时往往会形成较大的误差。随着生理生态研究的不断深入,分段函数^[17]也被用于玉米发育的温度效应计算,还发现不同物候期的三基点温度不同。非线性积温模型主要有沈国权^[18]非线性积温模型(NLM)、高亮之等^[19]的非线性模型、殷新佑^[20]的Beta模型、詹习武^[21]提出的发育速度与温度关系的数学模拟模式导出的积温模型、温强订正模型^[13]、戈配兹(GOM)模型^[22]等,这些线性或非线性模型有各自优缺点和不同适用范围。朱海霞等^[23]以水稻为例,基于温强系数研究成果和温度日变化事实,提出了集农学和生物学意义的积温计算方法,提高了积温计算精确度。赵倩等^[24]以东北春玉米为研究对象,对沈国权模型、高亮之模型和殷新佑模型的3种非线性积温模型进行拟合检验和稳定性评价,比较发现东北春玉米在应用沈国权非线性积温模型(NLM)模拟时,无效参数最少,且稳定性较好,因此,本文选用该模型进行相关研究。

本研究根据东北春玉米种植品种的实际情况出发,避免不同品种所需积温存在差异的影响,选择东北地区同一品种种植地区较广、种植年份较多的四单19为研究对象,应用NLM,通过影响机理分析,采用统计学方法分析年际间、地区间造成积温不稳定的原因,并与修正后的线性积温模型(TRM)进行比较,研究结果可为更精确的东北春玉米积温计算提供方法。

1 资料与模型

1.1 资料

1.1.1 资料来源

四单19品种种植地区为黑龙江省多个市县,本文选取3个站点:泰来站(2000—2010年)、哈尔滨站(1996—2009年)和青冈站(1997—2007年),共计33年站次数据(当不区分地点时则表示为混合站点)。主要包括逐年玉米品种、熟型、生育期日期。反映光温水条件的同期地面气象资料均来自国家气象信息中心。

1.1.2 生育期划分

作物不同生育期的三基点温度有显著差异。因此,依据作物生长特性及生育期资料的可获取性,将玉米生育期划分为3个主要阶段:出苗-拔节期,该阶段以营养生长为主;拔节-抽雄期,该阶段营养生长与生殖生长同时进行且同等重要;抽雄-成熟期,该阶段玉米主要以生殖生长为主,玉米产量形成与该时期气象条件关系密切。另外,将全生育期(出苗-成熟期)也作为一个阶段进行分析。

1.1.3 生育期三基点温度

春玉米在不同生育期三基点温度不同,根据文献^[25-27]确定不同生育期的三基点温度见表1。

表1 东北春玉米不同生育期的三基点温度(单位:℃)

Table 1 Temperatures of three fundamental points of spring maize in growing seasons(unit:℃)

生育期	最适温度	下限温度	上限温度
出苗-拔节期	24.0	12.0	35.0
拔节-抽雄期	28.0	16.0	35.0
抽雄-成熟期	24.0	15.0	35.0
出苗-成熟期	25.0	12.0	35.0

1.2 模型简介

1.2.1 NLM简介

沈国权^[18]认为作物生长发育速度是温度的非线性函数,指出发育速度($\frac{1}{n}$)与温度关系如下:

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{K}(T-B)^{(1+P)}(M-T)^{1+Q}, \quad (1)$$

$$A(T) = n(T-B), \quad (2)$$

因此,由沈国权提出的发育速度与温度的非线性模型可以导出有效积温的计算公式:

$$A(T) = K(T-B)^{-P}(M-T)^{-1-Q}. \quad (3)$$

其中, $A(T)$ 为有效积温, n 为生育期日数, T 为生育

期平均温度, M 及 B 分别为作物生长发育的生物学上限温度、下限温度, 该模型不包含最适温度项, 但可以通过对发育速度公式求导确定。规定 K, P, Q 均为大于零的参数, 当样本量较少时, P 依据经验取值为 0.5 或 0.5~1.0。

该模型考虑了作物生长发育的上下限温度及温度与发育速度的非线性关系, 但未加入影响积温稳定性的其他因子, 如光照、降水等, 针对非单纯感温性品种的适用可能存在局限性^[28]。 P, Q 为感温性参数, P, Q 的相对大小代表了从下限温度到最适温度和从最适温度到上限温度范围的相对大小。

1.2.2 影响积温稳定性因子的选择

温度对积温稳定性有影响, 此外, 光和水等其他要素对积温稳定性也有一定影响。选择的因子包括日平均温度、日最高温度、日最低温度、降水量、日照时数、温度日较差和光温比(指日照时数与同期积温的比值)7个气象因子, 计算各生育期的平均值。选择造成积温地区间差异和年际间差异的主要因子, 进一步考虑因子的自相关问题, 最终合理、客观地确定地区间、年际间积温差异的影响因子。

2 结果与分析

2.1 NLM 的参数拟合

利用选取的 NLM 对实际有效积温和生育期平均温度进行拟合, 求出模型参数, 分析参数 P 的取值对模型计算有效积温稳定性的影响及参数的有效性问题, 从而确定该品种在不同站及混合站点的拟合方程。文献[18]中规定参数 K, P, Q 均大于 0, 且 P 取值为 0.5 或 0.5~1.0。以黑龙江省泰来站为例, 探求参数的取值对模拟积温稳定性的影响(表 2)。由表 2 可知, 随着 P 由 0.5 增加到 1.0, Q 和 K 均大于 0 且逐渐增大, 不存在无效参数的情况; 当 NLM 取对数转化成线性方程拟合时, Q, K 的决定系数随 P 的增大呈增加趋势, 且均达到 0.01 显著性水平; 模型模拟的有效积温变异系数逐渐增大, 即积温的不稳定性逐渐增大。以变异系数最小为原则, 确定 P 的取值为 0.5, 与文献[18]中保持一致。该品种在哈尔滨站、青冈站以及混合站点拟合时皆表现如此, 因此, P 统一取 0.5, 最终得到不同站点及混合站点的 NLM(表 3)。

表 2 NLM 拟合参数及模型积温变异情况(泰来站)

Table 2 Fitting parameters of nonlinear model and variation coefficient(Tailai Station)

生育期	P	Q	K	线性转换决定系数	积温变异系数/%
出苗-拔节期	0.5	1.0123	$e^{12.6868}$	0.70	9.38
	0.6	1.1621	$e^{13.3011}$	0.73	9.40
	0.7	1.3120	$e^{13.9153}$	0.75	9.42
	0.8	1.4619	$e^{14.5296}$	0.77	9.44
	0.9	1.6117	$e^{15.1439}$	0.79	9.46
	1.0	1.7616	$e^{15.7581}$	0.81	9.48
拔节-抽雄期	0.5	0.8693	$e^{10.2277}$	0.87	20.97
	0.6	1.0041	$e^{10.7549}$	0.88	21.21
	0.7	1.1390	$e^{11.2821}$	0.89	21.46
	0.8	1.2738	$e^{11.8093}$	0.90	21.73
	0.9	1.4086	$e^{12.3365}$	0.90	22.01
	1.0	1.5434	$e^{12.8637}$	0.91	22.30
抽雄-成熟期	0.5	4.2089	$e^{20.7425}$	0.91	14.47
	0.6	4.5281	$e^{21.7664}$	0.92	14.54
	0.7	4.8472	$e^{22.7903}$	0.92	14.60
	0.8	5.1663	$e^{23.8143}$	0.93	14.67
	0.9	5.4855	$e^{24.8382}$	0.93	14.74
	1.0	5.8046	$e^{25.8621}$	0.94	14.81
出苗-成熟期	0.5	1.1779	$e^{13.9831}$	0.97	6.62
	0.6	1.3366	$e^{14.6211}$	0.98	6.63
	0.7	1.4953	$e^{15.2591}$	0.98	6.63
	0.8	1.6539	$e^{15.8971}$	0.98	6.64
	0.9	1.8126	$e^{16.5351}$	0.98	6.64
	1.0	1.9713	$e^{17.1731}$	0.98	6.65

注: 方程均达到 0.001 显著性水平。

表 3 分站及混合站点 NLM
Table 3 Nonlinear model fitted for each station and mixed ones

生育期	站点	拟合方程
出苗-拔节期	泰来	$A(T) = e^{12.6868} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.0123}$
	哈尔滨	$A(T) = e^{14.6129} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.8809}$ *
	青冈	$A(T) = e^{14.4623} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.7370}$ **
	混合站点	$A(T) = e^{16.8326} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-2.6384}$
拔节-抽雄期	泰来	$A(T) = e^{10.2277} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-0.8693}$
	哈尔滨	$A(T) = e^{11.5074} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.2226}$
	青冈	$A(T) = e^{16.3605} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-3.2350}$
	混合站点	$A(T) = e^{11.0222} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.0965}$
抽雄-成熟期	泰来	$A(T) = e^{20.7425} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-4.2089}$
	哈尔滨	$A(T) = e^{14.1598} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.7701}$
	青冈	$A(T) = e^{26.7917} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-6.3742}$
	混合站点	$A(T) = e^{17.7128} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-3.1065}$
出苗-成熟期	泰来	$A(T) = e^{13.9831} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.1779}$
	哈尔滨	$A(T) = e^{12.3094} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-0.5786}$
	青冈	$A(T) = e^{12.7876} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-0.7696}$ ***
	混合站点	$A(T) = e^{13.7376} (T-B)^{-0.5} (M-T)^{-1-1.1076}$

注: * 表示达到 0.004 显著性水平, ** 表示达到 0.01 显著性水平, *** 表示达到 0.029 显著性水平, 其余均达到 0.001 显著性水平。

各站点、各生育期 P 均小于 Q , 说明发育速度曲线左偏, 表明低温条件下发育速度随温度升高的增加率比超过最适温度后发育速度的衰减要快; 拟合的 3 个站中, 除哈尔滨站, Q 均在抽雄-成熟期最大, 说明生殖生长阶段的感温性较其他生育期强; 除泰来站, 全生育期的 Q 较分生育期小。

混合站点拟合时, 即不考虑积温在地区间的差异; Q 在抽雄-成熟期最大, 拔节-抽雄期和出苗-成熟全生育期较小, 亦可说明生殖生长阶段的感温性较强。

2.2 NLM 积温地区间差异

各生育期的 NLM 积温在泰来站、哈尔滨站、青冈站间均存在显著差异(表 4)。经 Scheffe 多重比较可知: 出苗-拔节期 NLM 积温地区之间差异极显著; 拔节-抽雄期泰来站与哈尔滨站差异表现为极显著(达到

表 4 不同站点 NLM 积温(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)

Table 4 Accumulated temperature of NLM at different stations(unit: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$)

生育期	泰来	哈尔滨	青冈
出苗-拔节期	540.2±53.1	314.2±30.5	400.9±37.6
拔节-抽雄期	116.1±25.50	169.6±34.8	138.1±42.6
抽雄-成熟期	355.9±54.0	382.3±39.9	255.5±41.8
出苗-成熟期	1253.0±87.0	1147.7±42.54	1036.1±26.33

注: 表中数值为积温平均值±标准差, 各生育期 NLM 积温地区间差异均达到 0.01 显著性水平。

0.002 显著性水平); 抽雄-成熟期青冈站与泰来站及哈尔滨站的差异均表现为极显著(均达到 0.001 显著性水平); 出苗-成熟期地区间差异也极显著。

出苗-成熟期随着平均温度的增加, 有效积温地区间差异越来越大(图 1)。由于积温在地区间存在

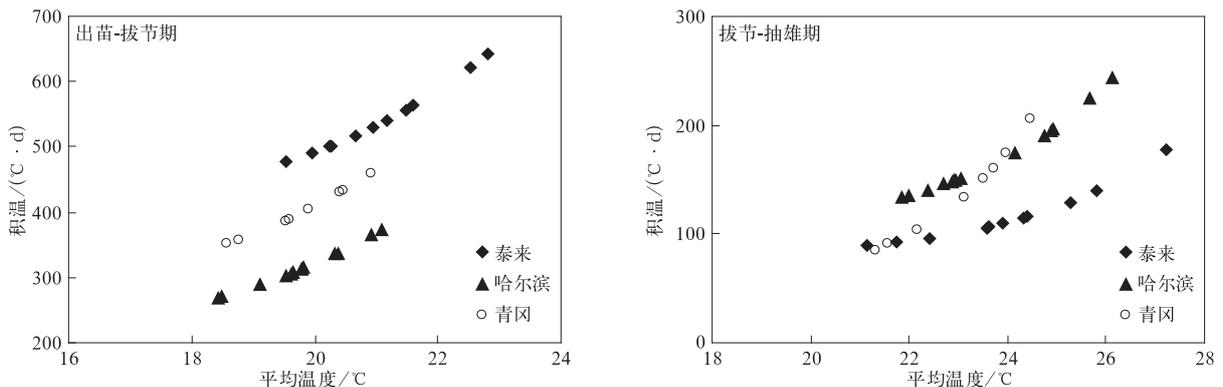
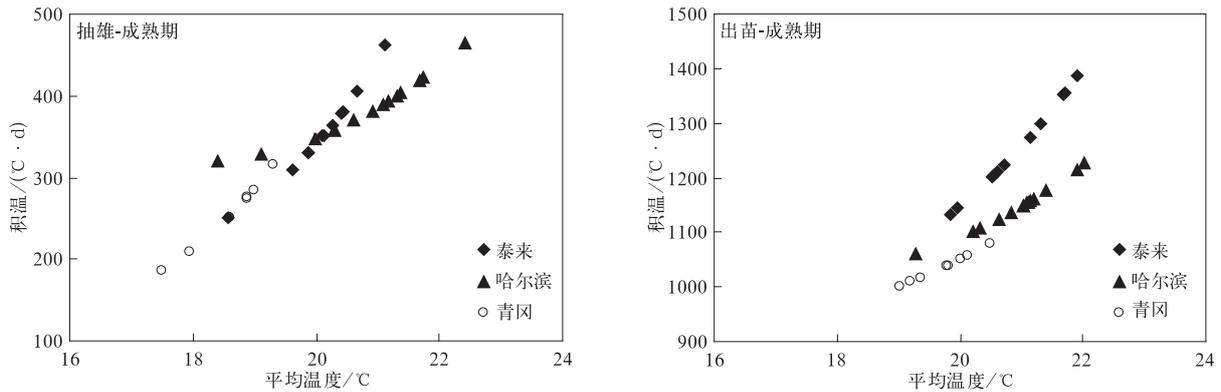


图 1 不同站点 NLM 积温与生育期平均温度的相关性

Fig. 1 Correlations between accumulated temperature by nonlinear model and mean temperature at different stations



续图 1

差异,即使生育期平均温度相同的情况下对应的有效积温也不尽相同,说明积温的地区间差异除受平均温度影响外,还存在其他因子的影响。

2.3 NLM 与 LM 积温比较

2.3.1 变异系数

NLM 积温均比线性积温模型(LM)计算的积

温稳定(表 5)。年际间变异系数表现为拔节-抽雄期和抽雄-成熟期变异系数较大,出苗-成熟全生育期的变异系数最小,这与生育期长短有关。由于有效积温在地区间存在差异,使混合站点模拟积温的变异比单站大。

表 5 NLM 与 LM 积温变异系数比较(单位:%)

Table 5 Comparison between variation coefficient of accumulated temperature obtained by nonlinear and linear models(unit:%)

站点	出苗-拔节期		拔节-抽雄期		抽雄-成熟期		出苗-成熟期	
	NLM	LM	NLM	LM	NLM	LM	NLM	LM
泰来	9.38	13.03	20.97	21.82	14.47	14.64	6.62	6.79
哈尔滨	9.35	17.51	19.75	24.29	9.91	15.61	3.57	6.26
青冈	8.76	12.47	28.88	29.19	15.30	18.58	2.38	5.12
混合站点	21.91	27.70	20.82	30.37	20.67	21.76	7.14	9.42

2.3.2 积温

同一玉米品种在不同地区所需积温有差异,说明地区环境差异对积温稳定性有影响,因此,为剔除地

区间差异造成的影响,需将不同地区玉米所需积温修正到相同水平。图 2 为混合站点即剔除了积温地区间差异模拟的 NLM 积温与 LM 积温的比较。

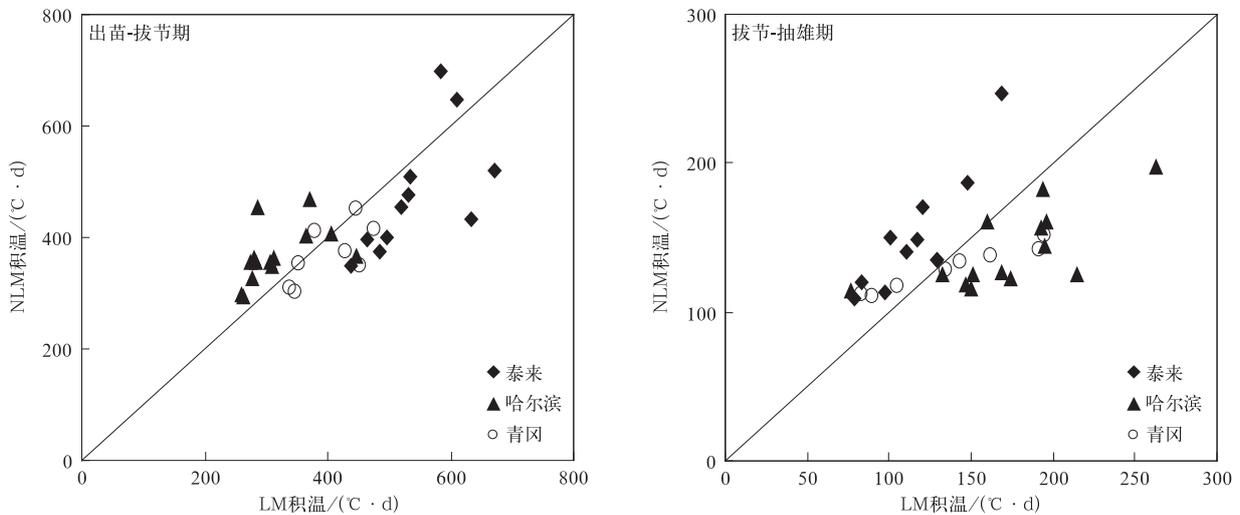
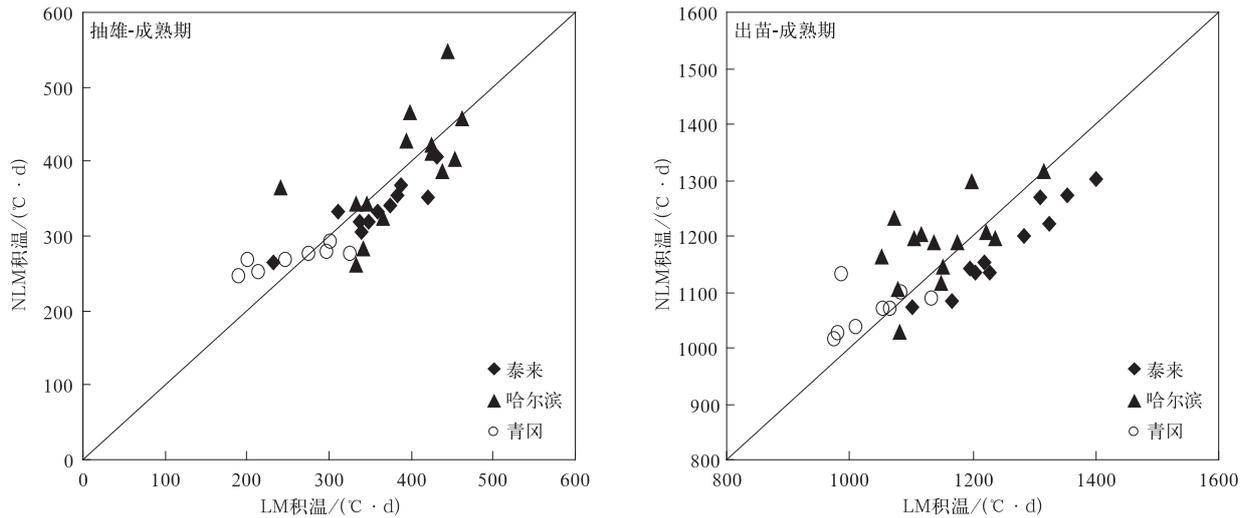


图 2 NLM 与 LM 积温对比

Fig. 2 Comparison between accumulated temperature obtained by nonlinear model and linear model



续图 2

分析出苗-拔节期 NLM 与 LM 积温可知:有效积温在该阶段从大到小为泰来站、青冈站、哈尔滨站,混合站点模拟后,则表现为泰来站的 NLM 积温小于 LM 积温,即有效积温模拟偏小,哈尔滨站大部分年份 NLM 积温大于 LM 积温,有效积温模拟偏大,说明这种站点混合进行模拟的结果减弱了地区间的差异。出苗-拔节期 NLM 积温最大值出现在泰来站(2010 年)达 697.27℃·d,次大值同样是在泰来站(2001 年),这是由于 2010 年和 2001 年该生育期平均温度较高,分别为 22.82℃,22.53℃,而多年站次平均值仅 20.18℃,说明温度强度是造成有效积温偏高的原因。其他生育期也有类似表现,如 2000 年泰来站的拔节-抽雄期,哈尔滨站 2008 年的抽雄-成熟期、2000 年的出苗-成熟期,均可说明积

温大小受温度强度的影响很大。

2.4 NLM 积温与气象因子的关系

分析 NLM 积温与气象因子的关系发现(图 3): 无论是否分站点,模拟有效积温与温度的相关关系表现为最好,与其他因子相关关系不明显。降水与有效积温的关系在出苗-拔节期、拔节-抽雄期、全生育期线性递减关系较显著,但东北地区发生降水时对应的温度会有所下降,考虑到温度与降水两个变量并不是相互独立的,且温度的相关性最好,因此,仅考虑温度对积温的影响,而生育期平均温度、平均最高温度、平均最低温度三者存在自相关关系,最终考虑模拟有效积温差异主要的影响因子是平均温度,即不同的温度强度是造成模拟有效积温差异的最主要因子。

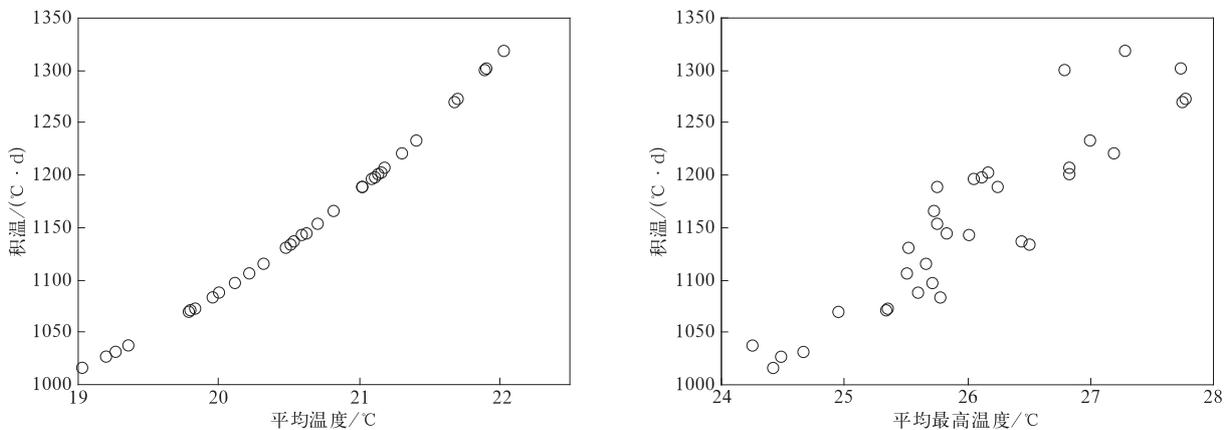
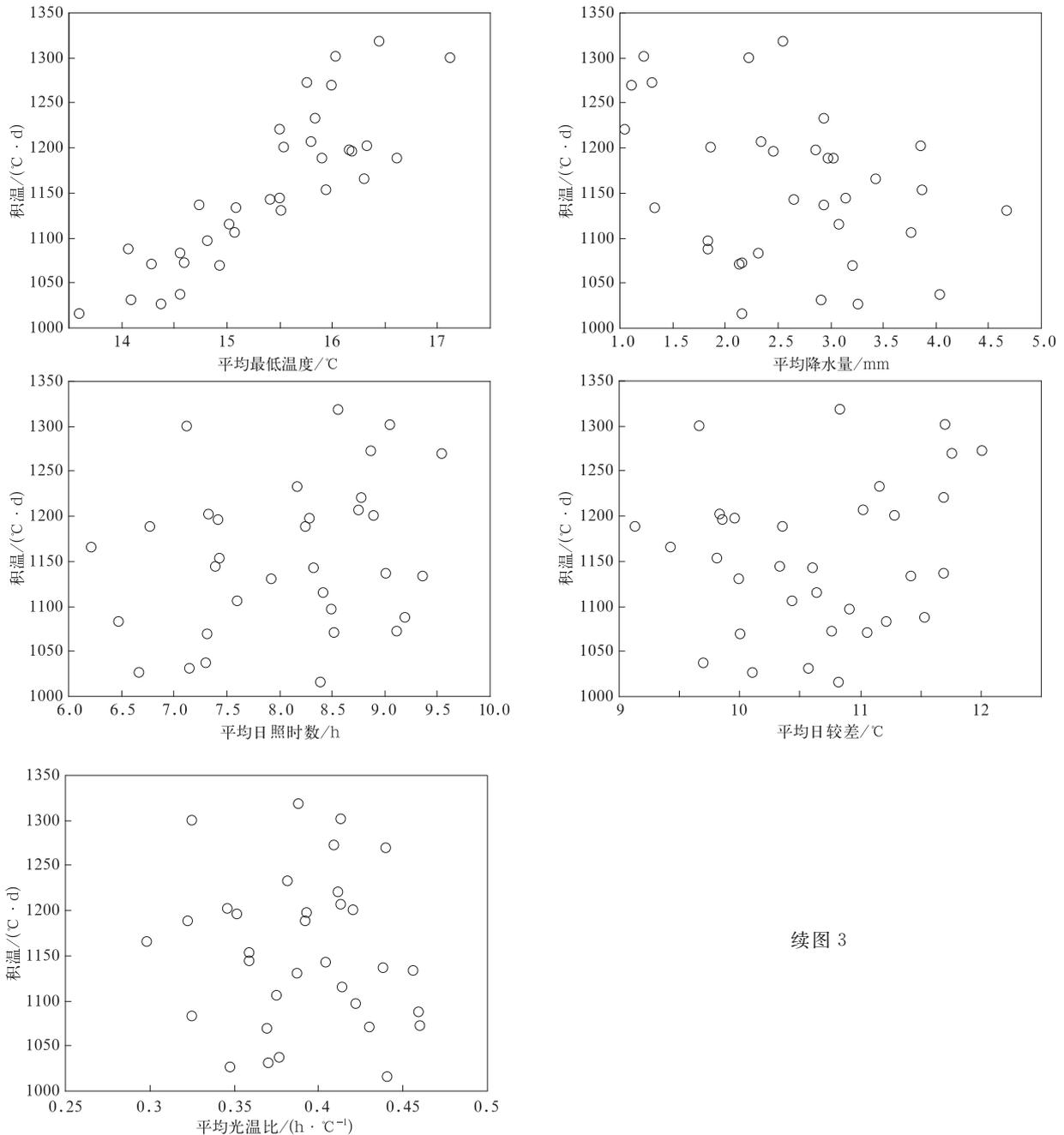


图 3 出苗-成熟期 NLM 积温与气象因子关系

Fig. 3 Relationship between accumulated temperature by nonlinear model and meteorological factors during emergence to maturity



续图 3

2.5 NLM 与 TRM 比较

各生育期 NLM 积温与生育期平均温度呈极显著的二次相关关系(图 4)。对积温模型公式求导,令一阶导数为 0,则二阶导数大于 0,说明该函数存在极小值,求出积温最小值对应的温度,出苗-拔节期为 14.78℃,拔节-抽雄期为 19.66℃,抽雄-成熟期为 17.17℃,出苗-成熟期为 16.41℃。发现各生育期有效积温最小值对应的温度均小于实际的各生育期平均温度,这也正是有效积温表现为随生育期平均温度的增加而增加的原因。

根据温度是造成积温不稳定的主要因子,提出使用平均温度的二次函数对 LM 进行修正(图 5)。设积温与生育期平均温度满足二次曲线关系:

$$y = aT^2 + bT + c, \quad (4)$$

式(4)中, T 为生育期平均温度, y 为平均温度修正模型积温。

根据温度二次方拟合结果可知,积温与生育期平均温度有较好的二次相关关系,但拟合曲线的开口向上、向下在各生育期表现不同,说明各生育期的积温随平均温度增加的表现不同,四单19品种出苗-

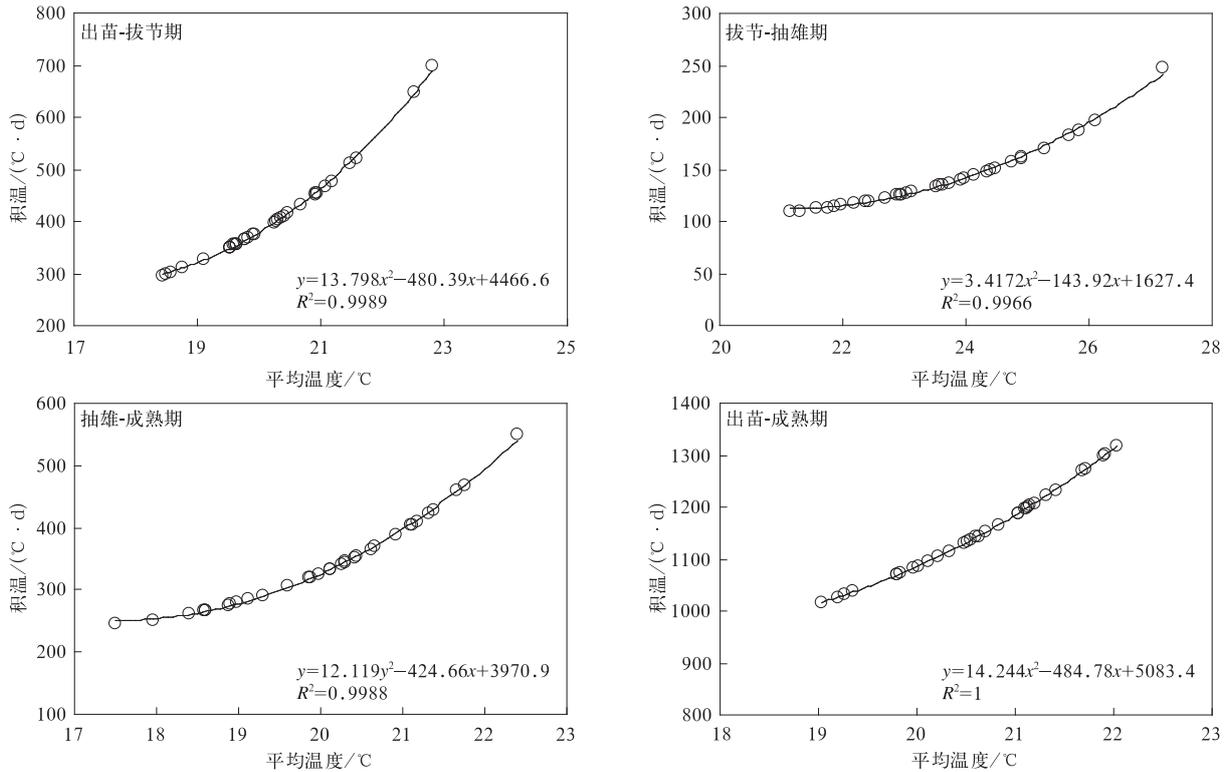


图 4 NLM 积温与生育期平均温度的二次相关分析(混合站点)
 Fig. 4 Quadratic correlation between accumulated temperature by nonlinear model and mean temperature(mixed stations)

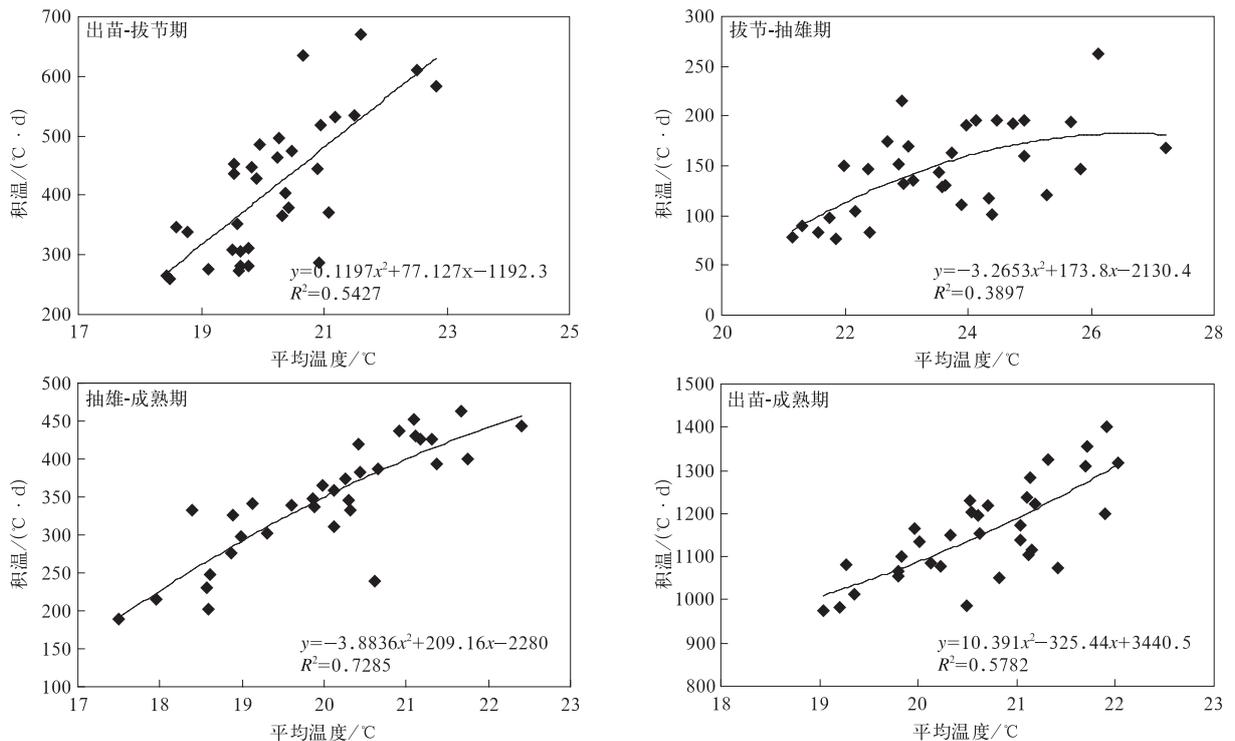


图 5 TRM 结果(混合站点)
 Fig. 5 Results obtained by temperature revision model(mixed stations)

拔节期及出苗-成熟期积温随温度增加越来越快,而拔节-抽雄期及抽雄-成熟期积温随温度增加越来越慢,这种不同表现可能还出现在不同品种间,因此,参数的品种间差异表现需要进一步探讨,而 NLM 积温在各生育期均表现为随温度增加越来越快。

2.5.1 NLM 及 TRM 拟合效果比较

分析两种方法的模拟值与实测值拟合效果,决定系数与归一化均方根误差结果见表 6。各站及混合站点(除出苗-成熟期)拟合时,TRM 积温与实际

积温值线性拟合的决定系数大于 NLM,且归一化均方根误差表现为 TRM 小于 NLM;混合站点拟合时出苗-成熟期表现相反,但是二者相差不大;NLM 积温仅在哈尔滨站和青冈站的出苗-拔节期、青冈站的出苗-成熟期与实测值线性拟合未通过显著性检验,对于东北春玉米生长发育所需积温具有一定的模拟能力;TRM 积温与实测值线性拟合除青冈站出苗-拔节期外均通过显著性检验,模拟效果优于 NLM。

表 6 NLM 与 TRM 积温决定系数与归一化均方根误差

Table 6 R^2 and normalized root mean square error of accumulated temperature obtained by nonlinear model and temperature revision model

站点	生育期	决定系数		归一化均方根误差	
		NLM	TRM	NLM	TRM
泰来	出苗-拔节期	0.4149*	0.5713**	10.0224	8.5341
	拔节-抽雄期	0.7513**	0.7746**	11.0674	10.3617
	抽雄-成熟期	0.8014**	0.8553**	6.6636	5.5704
	出苗-成熟期	0.9366**	0.9406**	1.7100	1.6534
哈尔滨	出苗-拔节期	0.2549	0.3139*	15.1518	14.5037
	拔节-抽雄期	0.5065**	0.5265**	17.2740	16.7126
	抽雄-成熟期	0.4084*	0.4139*	12.0380	11.9491
	出苗-成熟期	0.3735*	0.4050*	4.9659	4.8311
青冈	出苗-拔节期	0.4540	0.4963	9.2304	8.8518
	拔节-抽雄期	0.9574**	0.9621**	6.0310	5.6866
	抽雄-成熟期	0.7024**	0.7065**	10.1577	10.0677
	出苗-成熟期	0.1740	0.7359**	4.6613	2.6322
混合站点	出苗-拔节期	0.5096**	0.5427**	19.5490	18.7301
	拔节-抽雄期	0.2628**	0.3897**	26.6452	23.7275
	抽雄-成熟期	0.6340**	0.7285**	13.5658	11.3389
	出苗-成熟期	0.5786**	0.5782**	6.1211	6.1213

注: * 表示达到 0.05 的显著性水平; ** 表示达到 0.01 的显著性水平。

2.5.2 NLM 及 TRM 稳定性比较

混合站点比较发现 NLM 积温的稳定性略差于 TRM 结果(除出苗-成熟期)(表 7),各站不同生育

期两模型积温稳定性的相对大小表现有差异,但相差不大。

表 7 NLM 与 TRM 积温变异系数比较(单位: %)

Table 7 Comparison between variation coefficient of accumulated temperature obtained by nonlinear model and temperature revision model(unit: %)

站点	出苗-拔节期		拔节-抽雄期		抽雄-成熟期		出苗-成熟期	
	NLM	TRM	NLM	TRM	NLM	TRM	NLM	TRM
泰来	9.38	9.85	20.97	19.20	14.47	13.54	6.62	6.58
哈尔滨	9.35	9.81	19.75	17.63	9.91	10.04	3.57	3.99
青冈	8.76	8.79	28.88	28.62	15.30	15.62	2.38	4.39
混合站点	21.91	20.40	20.82	18.96	20.67	18.57	7.14	7.17

由上述分析可知, NLM 对于东北春玉米生长发育所需积温有一定模拟能力,但 TRM 积温与实测值线性拟合的决定系数高于 NLM,均方根误差

小于 NLM(除混合站点拟合时的出苗-成熟期),且两模型模拟的积温稳定性相差不大,说明使用平均温度的二次函数对 LM 进行修正的方法可行,可能

更适合于东北春玉米品种积温的模拟研究。

3 结论与讨论

研究表明:

1) 以东北春玉米四单 19 品种为例,应用 NLM 进行拟合,分析参数选择对积温稳定性的影响,明确参数 P 越小,模拟有效积温越稳定,最终确定参数 P 取为 0.5。

2) NLM 积温在年际间、地区间均存在差异,造成积温不稳定的主要因子是温度强度,与其他因子相关性较差。

3) 比较 NLM 与 TRM 结果表明:NLM 对于东北春玉米生长发育所需积温有一定的模拟能力,但 TRM 模拟效果更好,且二者稳定性相差不大,在东北春玉米积温模拟研究中具有可行性。

文中计算积温所用的日平均温度来自于气象观测场百叶箱观测的温度,而观测场与实际的农田气象条件有差异,会造成一定误差。本文选取地点的原则是选取观测年份、种植地点较多的玉米品种,本文确定 3 个站点,位于黑龙江省,地理位置比较相近,但同一品种选取的地点较少,今后可以考虑进一步增加试验站点数量,确定出同一品种在多个地区均通用的积温指标十分必要。影响东北地区春玉米有效积温的气象因子除温度强度外,还有降水量和光照,本文并未得到显著的相关关系,但存在降水量在年份间及地区间分布不均匀的情况,个别年份发生严重干旱。在吉林西部、辽宁西部、黑龙江南部和山西、河北北部,常出现夏旱、伏旱、秋吊现象,尤其春旱频发,有“十年九春旱”之说^[29],严重影响作物生长发育,因此,水分条件也是造成玉米积温不稳定的重要因子。此外,其他突发性的自然灾害、病虫害等胁迫因素造成的影响研究不足,需进一步探讨。

我国东北地区玉米带始于黑龙江中南部,主要包括吉林、内蒙古东部以及辽宁的北部地区,是世界“三大黄金玉米带”之一,该地区玉米种植面积及产量均占全国很大比例。研究东北地区玉米不同生育期生长发育所需积温与环境因子的关系,可以为生育期预报和产量预报提供依据。玉米生长发育对温度的变化较为敏感,研究发现温度过高或过低均会抑制玉米的生长发育^[30],这种温度强度的过高或过低均会造成积温的不稳定性。本文在前人研究基础上以拟合结果无效参数较少和模型积温较稳定为原

则选择了沈国权非线性积温模型(NLM),该模型最初用于研究杂交水稻制种的花期相遇预报,而本文将该模型应用于东北春玉米,也可能存在模型的适用性问题。

本文仅以春玉米品种四单 19 为研究对象,TRM 对于该品种较适用,但对于其他品种的适用性仍需要进一步讨论。作物模型对不同的模拟对象确定的是不同的特性参数,玉米生长发育的模拟研究试验多采用春玉米、夏玉米为供试品种,李超等^[31]以冬玉米为研究对象,在已有生育期模型基础上,通过模型修正、参数调试、检验,构建一个新的物候发育模型,有助于提高玉米模拟研究的机理性和广适性。玉米品种众多,不同品种之间的参数不能通用,导致不同玉米品种存在反映自身生物学特性的参数,本文仅选取一个春玉米品种,对其他玉米品种可能不适用,参数的适用性可能不满足需求,因此,还需要考虑建立参数与品种、熟型、叶片数等其他因子的关系,形成不同品种对应的参数库,增强模型的广适性、实用性。

参考文献

- [1] 郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. 应用气象学报, 2015, 26(1): 1-11.
- [2] 钱拴, 陈晖, 王良宇. 全国棉花发育期业务预报方法研究. 应用气象学报, 2007, 18(4): 539-547.
- [3] 张雪芬, 王春乙, 陈东, 等. 基于位温的小麦发育期的小网格推算方法. 应用气象学报, 2007, 18(6): 865-869.
- [4] 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年黑龙江省地区热量资源变化特征. 应用气象学报, 2010, 21(3): 266-278.
- [5] 西涅里席柯夫 B B. 普通农业气象学. 北京农业大学译. 北京: 高等教育出版社, 1959: 84-95.
- [6] 王宏燕, 彭驰, 侯中田. 降水和地积温对有机肥腐解的动态分析. 黑龙江省农业大学学报, 1996, 27(1): 20-25.
- [7] 张家诚, 高素华, 潘亚茹. 我国温度变化与冬季采暖气候条件的探讨. 应用气象学报, 1992, 3(1): 70-75.
- [8] 刘少军, 周广胜, 房世波. 1961—2010 年中国橡胶寒害的时空分布特征. 生态学杂志, 2015, 34(5): 1282-1288.
- [9] 屈振江, 周广胜, 魏钦平. 苹果花期冻害气象指标和风险预估. 应用气象学报, 2016, 27(4): 385-395.
- [10] Birch C J, Hammer G L, Rickert K G. Temperature and photoperiod sensitivity of development in five cultivars of maize (*Zea mays* L) from emergence to tassel initiation. *Field Crops Research*, 1998, 55(1-2): 93-107.
- [11] Tollenaar M. Duration of the grain-filling period in maize is not affected by photoperiod and incident PPFD during the vegetative phase. *Field Crops Research*, 1999, 62(1): 15-21.
- [12] 徐铭志, 任国玉. 近 40 年中国气候生长期的变化. 应用气象学

- 报,2004,15(3):306-312.
- [13] 沈国权. 当量积温及其应用. 气象,1981,7(7):23-25.
- [14] 全国杂交水稻气象科研协作组. 杂交水稻制种花期相遇的积温稳定性研究. 气象,1981,7(1):21-24.
- [15] 马玉平,张黎,孙琳丽,等. 持续性温强和土壤水分对玉米发育进程的影响及其模拟. 中国农学通报,2015,31(3):186-193.
- [16] 朱伯伦. 积温的不稳定性及其订正. 贵州农业科学,1985(1):63-64.
- [17] 孙小龙,闫伟兄,武荣盛,等. 基于气候适宜度建立河套灌区玉米生育期模拟模型. 中国农业气象,2014,35(1):62-67.
- [18] 沈国权. 影响作物发育速度的非线性温度模式. 气象,1980,6(6):9-11.
- [19] 高亮之,金之庆,黄耀,等. 水稻计算机模拟模型及其应用之一——水稻钟模型——水稻发育动态的计算机模型. 中国农业气象,1989,10(3):3-10.
- [20] 殷新佑. 水稻发育温度效应的非线性模型及其应用. 作物学报,1994,20(6):692-700.
- [21] 詹习武. 作物发育速度与温度关系的数学模式研究. 南京气象学院学报,1988,11(1):15-24.
- [22] 韩永庄. 戈配兹模型在生物积温预报中的应用. 安徽农学通报,2013,19(23):11-12.
- [23] 朱海霞,李秀芬,王萍,等. 黑龙江省水稻生长季积温计算方法. 应用气象学报,2017,28(2):247-256.
- [24] 赵倩,郭建平. 不同积温模型的稳定性评估——以东北春玉米为例. 生态学杂志,2016,35(10):2852-2860.
- [25] 王宗明,张柏,张树清,等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究. 中国农业气象,2005,26(1):1-6.
- [26] 袁彬,郭建平,冷明珠,等. 气候变化下东北春玉米品种熟型分布格局及其气候生产潜力. 科学通报,2012,57(14):1252-1262.
- [27] Xu Y H, Guo J P, Zhao J F. Scenario analysis on the adaptation of different maize varieties to future climate change in Northeast China. *J Meteor Res*,2014,28(3):469-480.
- [28] 潘永地,粟志钢. 有关水稻生育期生长模拟综述. 浙江农业科学,2011,1(2):434-438.
- [29] 白彩云. 中国东北地区玉米种植的气候适应性研究. 石河子:石河子大学,2010.
- [30] 张吉旺,董树亭,王空军,等. 大田增温对夏玉米光合特性的影响. 应用生态学报,2008,19(1):81-86.
- [31] 李超,李文峰,钱晔. 热带区域冬玉米物候发育的模拟与模型检验. 中国农学通报,2015,31(24):53-58.

Improvement and Comparison of the Accumulated Temperature Model of Northeast Spring Maize

Li Rui¹⁾ Guo Jianping¹⁾²⁾

¹⁾(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾(Collaborative Innovation Center of Meteorological Disaster Forecast, Early Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract

Spring maize in Northeast China plays a more and more important role in the national maize production. The gradually increase in acreage, the per unit area yield and total yield of spring maize have markedly improved since 1980s. Accumulated temperature is one of indexes which are commonly used in agricultural meteorological research and operation service. It's also used in crop model and regional thermal resource analysis which can reflect differences in demand of heat resources between different crops and varieties. And it can also be used to evaluate the suitability of heat conditions in a certain area for crop growth and development to avoid blindness of crops introduction. But in fact, the stability of accumulated temperature is relative, and it fluctuates with differences of crop varieties, locations, years and growth periods. It results in the limited application of the accumulated temperature index. Besides environmental conditions, the instability of accumulated temperature is also affected by different calculation methods. In general, accumulated temperature models are divided into two categories, including linear model and nonlinear model. Therefore, how to choose and revise the existing model for stabilizing the calculation value of accumulated temperature and making it fit well with the actual situation is of great significance for agricultural production and meteorological service.

Based on observations of spring maize and meteorological data in Northeast China, the spring maize Sidan19 is taken as an example. The nonlinear accumulated temperature model proposed by Shen Guoquan with good stability is adopted to fit, and the influence of parameter selection on the stability of accumulated temperature is analyzed. The quadratic function of mean temperature to the linear model is revised and analyzed, and the nonlinear model is compared. Results show that the stability of accumulated temperature is related to the parameter P , more stable with smaller P . However, accumulated temperature calculated by the nonlinear model shows inter-annual and inter-regional differences. The main cause for the instability is different temperature strength and its less correlated with other meteorological factors. For each growth period, fitted curves between accumulated temperature and mean temperature are quadratic. The fitting effect of the accumulated temperature calculated by the revised linear model is better than that of Shen Guoquan nonlinear model. Moreover, the stability doesn't appear to be much different between two methods. Thus, the revision of linear model considering the mean temperature for spring maize in Northeast China is feasible, which can help revising agro-meteorological indexes and improving agriculture service capacity.

Key words: spring maize; accumulated temperature model; stability; revision model