

基于线性生长假设利用极端温度计算日积温的方法

姜会飞¹ 温德永^{2*}

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 加拿大滑铁卢大学 大气科学中心, 滑铁卢 N2L3G1)

摘要 积温是评估区域热量资源和测算生长发育进程的重要指标, 准确计算日积温是作物模型中有效模拟和预测作物生长发育进程和科学调控田间水肥管理的基础。本研究基于生物生长发育速率对温度的线性假设和日极端温度论述了目前流行的2种日积温模型的利弊, 并在正弦模拟温度日变化计算小时温度的前提下, 引进以时积温改进日积温模型的方法。首先从理论上论述了日均温法可能导致真正的日积温被高估或低估和日极值法可能高估日积温, 然后以实例分析和论证了3种日积温模型与真正的日积温间的差异, 得出时积温方法计算日积温误差相对最小的结论。为准确估算日积温, 建议基于线性假设和日极端温度计算日积温时采用这种时积温方法。

关键词 积温; 线性假设; 正弦模拟; 温度日变化; 时积温

中图分类号 S 161.2

文章编号 1007-4333(2013)01-0082-06

文献标志码 A

Methods of calculating growing degree-day based on LR assumption and daily extreme temperatures

JIANG Hui-fei¹, WEN De-yong^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Waterloo Center for Atmospheric Sciences, University of Waterloo, Waterloo N2L3G1, Canada)

Abstract Growing degree-day (GDD) is an important indicator for assessing regional heat resources and timing phenol-stage process, and correct GDD calculation is the basis of water and fertilizer management in agricultural production and accurate simulation and prediction of crop growth and development in crop models. In this paper, two popular methods of calculating GDD based on assumption of linear response of growth and development to temperature (LR assumption) and daily extreme temperatures were reviewed, and a growing degree-hour (GDH) method of calculating growing degree-days was introduced. Hourly temperature was estimated by diurnal temperature curve simulated by sine wave based on extreme temperatures. Theoretical argument showed that daily average temperature method may result in an over- or under-estimated GDD, and daily extreme temperatures method may result in an over-estimated GDD; Case study showed the GDH method had the smallest error comparing with the true GDD in three methods. To calculate accurately GDD, GDH method is recommended strongly when GDD is calculated by extreme temperatures based on LR assumption.

Key words growing degree-day; LR assumption; sine wave simulation; diurnal temperature variation; growing degree-hour

生物完成某种发育进程需要具有一定温度条件的
时间积累, 这一现象很早就引起了人们的注意。

1735年, 法国 A. F. de Réaumur 指出植物从种植到
成熟要求一定量温度的累积, 并首先提出了积温的

收稿日期: 2012-04-07

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD32B02, 2012BAD20B02); 国家自然科学基金项目(41075084); 公益性行业(气象)科研专项经费项目(GYHY201006026)

第一作者: 姜会飞, 副教授, 博士, 主要从事农业气象预报和灾害风险分析, E-mail: jianghuiwei@sohu.com

通讯作者: 温德永, 研究员, 博士, 主要从事应用气象研究, E-mail: dwen@scimail.uwaterloo.ca

概念^[1]。此后,热量单位(heat unit)、热时(thermal time)、温度指数(temperature index)和度·日(growing degree-day)等积温概念被广泛应用于植物^[2]、动物^[3]和昆虫^[4]等生物生长发育对温度的反应中。度·日(GDD,growing degree-day)是近年来国际期刊中最频繁出现的术语,因此本研究采用 GDD 来描述积温和构建日积温模型。

在现行的科技文献中,生物生长发育速率对温度的反应可以归纳为以下 4 种线性假设模式(图 1),且被广泛应用于研究温度对生长发育影响的积温估算中。4 种模式都以当温度(T)高于生物学下限温度(T_{base})生长发育才发生为前提,并假定在温度等于或低于下限温度时生长发育不发生(即生长

发育速率(R_{gd})等于 0.0)。当温度高于下限温度时,假设 A^[5]——生长发育速率随温度的增加而线性增长;假设 B^[6]——生长发育速率随温度升高而线性增长达到最大值(1.0),此时对应的温度为上限温度(T_{upper}),当温度高于上限温度后,生长发育就停止(生长发育速率等于 0.0);假设 C^[7]——生长发育速率随温度升高而线性增长达到最大值(1.0)后,随温度的升高而保持恒定不变;假设 D^[8]——生长发育速率随温度升高而线性增长达到最大值(1.0),此时对应的温度为最适温度(T_{opt}),此后,随温度的升高生长发育速率反而降低直至温度达到上限温度时,生长发育速率降至 0.0,此时对应的温度为上限温度,温度高于上限温度,生长发育处于停滞

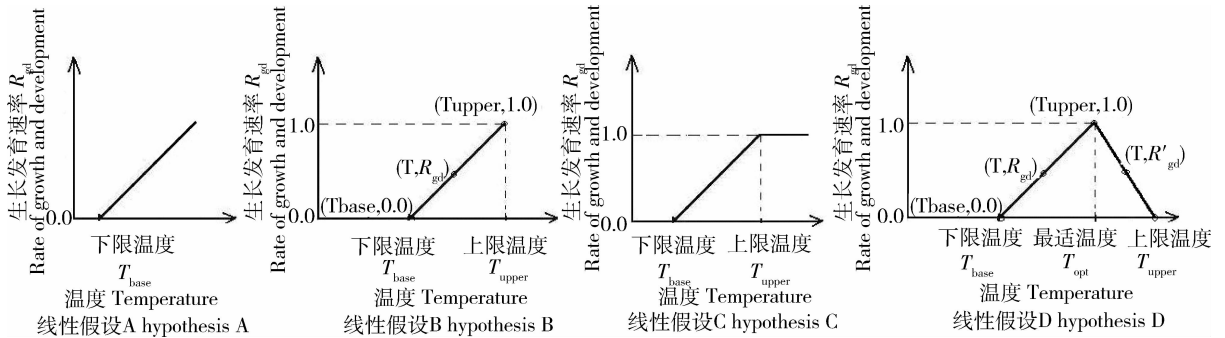


图 1 生长发育速率对温度反应的 4 种线性假设

Fig. 1 Four hypothesis of response of rate of growth and development to temperature

状态。

对于图 1 中的 4 种假设,假设 D 显然是最符合生物学规律的,这种包含最适(优)温度的第 4 种假设 D 也被称为优化假设(Optimized assumption)^[6]。目前国际期刊中计算积温使用最广泛的还是线性假设 B,这种假设仅考虑上下限温度 2 个基点温度指标。基于线性生长假设 B,对生长发育有效的温度(简称有效温度)处于上下限温度范围内,一天中温度处于有效范围的时间(或时段)称为有效时间(或时段);而低于下限或高于上限的温度则是无效的,简称为无效温度,相应地一天中温度无效的时间(或时段)称为无效时间(或时段)。本研究拟基于线性假设 B 从理论上对比分析目前流行的几种积温计算方法,并结合实例研究,探寻相对准确有效的日积温计算方法。

2 日积温计算的理论基础

2.1 基础模型

早期最基本的积温公式仅考虑日均温与生物学下限温度,日积温 GDD 的具体计算方法如下

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \quad (1)$$

式中: T_{max} 、 T_{min} 为日最高温度和日最低温度,且当日均温 $\frac{T_{max} + T_{min}}{2} < T_{base}$ 时,GDD 取值为 0.0^[9]。

根据假设 A,如果温度升高,生长发育速率就会无限加快。这种没有考虑上限温度的假设是不符合实际情况的,Baskerville 提出综合考虑下限温度和上限温度对日积温计算方法的修订,并指出温度高于上限和低于下限时,生长发育停止^[10]——这种方

法可以图1中的假设B来描述,生长发育速率在温度升高至上限温度时达到最大值(1.0),此后生长发育速率就降为0.0。

于是,基于假设B,基础模型(1)发展为

$$GDD = \begin{cases} 0.0, & \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} < T_{\text{base}} \\ \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_{\text{base}}, & T_{\text{base}} \leq \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \leq T_{\text{upper}} \\ 0.0, & \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 数学依据

依据图1中的线性假设B,则对应不同的温度范围而产生的生长发育速率分别为

$$R_{\text{gd}} = \begin{cases} 0.0, & T < T_{\text{base}} \\ \frac{T - T_{\text{base}}}{T_{\text{upper}} - T_{\text{base}}}, & T_{\text{base}} \leq T \leq T_{\text{upper}} \\ 0.0, & T > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (3)$$

对特定发育阶段的作物品种 T_{base} 和 T_{upper} 也就确定,公式(3)经两边同时乘以常数 $(T_{\text{upper}} - T_{\text{base}})$ 的数学转换,温度在一天内对生长发育的积累影响 GDD 可以通过积分计算

$$GDD = (T_{\text{upper}} - T_{\text{base}}) \int_0^1 R_{\text{gd}} dt \quad (4)$$

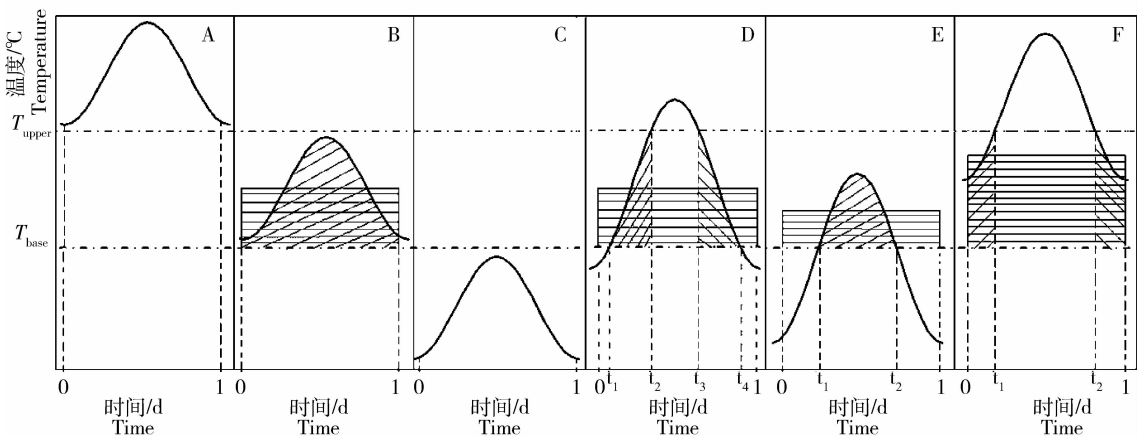


图2 温度日变化曲线与上下限温度关系示意图

Fig. 2 Schematic of relationship between temperature curve and T_{base} , T_{upper}

时低于上限。

对于图2中的前3种情形,公式(2)和公式(5)是可以用于计算当天的日积温 GDD 的,但后3种

当温度一天都稳定处于 $< T_{\text{base}}$ 、 T_{base} 至 T_{upper} 或 $> T_{\text{upper}}$ 温度段之一时,则公式(4)可转换为

$$GDD = \begin{cases} 0.0, & T < T_{\text{base}} \\ T_{\text{avg}} - T_{\text{base}}, & T_{\text{base}} \leq T \leq T_{\text{upper}} \\ 0.0, & T > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{avg} 为日均温。不难看出,基础公式(2)与公式(5)是相同的。这说明基于线性假设B,基础模型(2)只适合计算一天内温度稳定处于无效时段 ($T < T_{\text{base}}$ 或 $\geq T_{\text{base}}$) 或有效时段 ($T_{\text{base}} \leq T \leq T_{\text{upper}}$) 的简单情景下的日积温,而对于温度日变化情形相对复杂一些的(一天中温度在有效和无效间变化波动)则需要结合公式(3)和(4)通过分段积分相加的方式来求算该日真正的积温值。

2.3 温度日变化与两基点温度的关系

温度随时间具有连续变化的特性,温度日变化曲线通常被描述为正弦波函数^[10-13]。温度日变化正弦波曲线与上下限温度的关系可归纳为以下6种情景(图2):A,全天温度都高于上限温度;B,一天内温度稳定处于两基点温度之间;C,全天温度都低于下限温度;D,温度有时低于下限温度,有时高于上限温度,且日平均温度处于两基点之间;E,一天内温度都低于上限温度,但有时高于下限有时低于下限;F,一天内温度都高于下限,但有时高于上限有

情形这么简单的统计相加就不能正确地估算温度对生长发育的影响,而需要通过积分求算不同时间段温度对生长的累计影响。

3 日积温模型

以生长发育速率对温度反应为线性假设 B, 基于日极端温度的日积温模型在农业生产和作物模型较流行的主要有日均温模式和日极值模式 2 种。

3.1 日均温模式

用日极端温度计算出日均温后, 直接简单地把日均温与上下限温度进行比较来并根据公式(2)估算日积温, 这里用 GDD_1 来表示以这种方法估算的 GDD 值, 具体计算方法如下

$$GDD_1 = \begin{cases} 0, & T_{\text{avg}} < T_{\text{base}} \\ T_{\text{avg}} - T_{\text{base}}, & T_{\text{base}} \leq T_{\text{avg}} \leq T_{\text{upper}} \\ 0, & T_{\text{avg}} > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 日均温 $T_{\text{avg}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2}$ 。

这种模式被接受并应用到作物模型中计算 GDD^[14]。基于线性假设 B, 对照图 2 可以看出, 这种没有考虑温度日变化的日积温计算结果与实际相符的只有 A、B、C 的 3 种情景。在情景 F 中, 日均温大于上限, 按该模式从公式(6)可计算 $GDD=0$ 。0, 但该日温度是变化的, 虽然日均温大于上限, 但还存在 2 个温度处于上下限之间的有效时段, 图中斜线阴影部分的面积就是该日对作物生长发育有效的真实积温^[10]。显然, 日均温模式的 GDD 对情景 F 被低估了, 同样情景 E 的 GDD 也被低估了; 而对情景 D 则被高估了。也就是说, 这种只比较日均温与上下限温度的日积温模式可能导致 GDD 被高估或低估, 使日积温计算结果失真, 而产生不准确的生长发育进程模拟和预测。

3.2 日极值模式

近年来, 通过比较日极值与上下限温度来改进 GDD 计算的方法被广泛接受, 并越来越多地替代日均温模式而成为主流^[14-17]。这种方法是把低于下限的日最低温度订正到下限温度, 把高于上限的日最高温度订正到上限温度, 然后按更新调整的日极值温度 (T'_x 和 T'_n) 计算日均温 $T'_{\text{avg}} = \frac{T'_x + T'_n}{2}$, 再通过比较 T'_{avg} 和上下限温度关系来估算 GDD, 这里用 GDD_2 表示以该方法估算的 GDD, 具体方法如下

$$GDD_2 = \begin{cases} 0, & T'_{\text{avg}} < T_{\text{base}} \\ T'_{\text{avg}} - T_{\text{base}}, & T_{\text{base}} \leq T'_{\text{avg}} \leq T_{\text{upper}} \\ 0, & T'_{\text{avg}} > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (7)$$

从表面来看, 这种方法踢除了对生长发育没有贡献的高于上限和低于下限的温度, 好像是过滤掉了一天中无效的温度而获得真实的 GDD。但如果对照图 2 来分析就不难发现: 除情景 B 的日极值不需要订正外, 其他 5 种情景的日均温都因日极温订正而得到调整。情景 A 把日最高温度订正到上限, 调整后的日均温仍然高于上限; 而情景 C 则把日最低温度订正到下限, 调整后的日均温仍然低于下限; 这 2 种情景调整前后的 GDD 没有变化, 从数值上来说符合线性假设 B 温度对生长发育的零贡献。根据公式(7)可知, 情景 D、E、F 调整后的 GDD(矩形面积)都大于调整前真实的 GDD(斜线阴影部分面积), 这表明日极值模式高估了这 3 种情景的 GDD, 从而导致日积温结果失实。

事实上, 日极值模式订正后的日均温只是有效温度时段的平均温度。把温度对生长发育产生影响的有效时段拓展为全天, 对图 2 中的后 3 种情景而言, 对延长了时间尺度的平均温度自然应该小于有效时段的平均温度。以有效时段的平均温度代替日均温导致了 GDD 被高估。以情景 D 为例, 订正后 $T'_{\text{avg}} = \frac{T_{\text{base}} + T_{\text{upper}}}{2}$, 按这种模式计算得到的 $GDD_2 = \frac{T_{\text{upper}} - T_{\text{base}}}{2}$; 而该天温度处于有效范围的平均温度等于 $\frac{T_{\text{base}} + T_{\text{upper}}}{2}$, 有效时段为 $t_1 \rightarrow t_2$ ($\Delta t_1 = t_2 - t_1$) 和 $t_3 \rightarrow t_4$ ($\Delta t_2 = t_4 - t_3$), 当天真正有效的 $GDD = \left(\frac{T_{\text{base}} + T_{\text{upper}}}{2} - T_{\text{base}} \right) \times (\Delta t_1 + \Delta t_2) = \frac{T_{\text{upper}} - T_{\text{base}}}{2} \times (\Delta t_1 + \Delta t_2)$ 。很明显, 温度有效的时段只是当天的一部分时间, $\Delta t_1 + \Delta t_2 < 1$ 天, 因而实际 GDD 明显小于 GDD_2 。即日极值法会使 GDD 被高估。

3.3 时积温模型

当利用正弦曲线模拟温度日变化准确测算到一天中温度达到上下限温度的时间, 则通过求有效段内正弦曲线与下限温度间所围成的面积就可以求得准确真实的 GDD^[10]。这种积分法虽然结果准确, 但应用起来很麻烦。于是, 我们利用正弦模拟得到一天 24 h 的小时温度, 结合小时温度累积计算日有效温度的方法^[18](简称为时积温方法)计算日积温如下

$$GDH_i = \begin{cases} 0, & t_i < T_{\text{base}} \\ t_i - T_{\text{base}}, & T_{\text{base}} \leq t_i \leq T_{\text{upper}} \\ 0, & t_i > T_{\text{upper}} \end{cases} \quad (8)$$

式中： t_i 为一天 24 h 中第 i 小时的温度， G_{DH}_i 为该小时的有效温度。下面用 GDD_3 表示以时积温模型估算的 GDD，具体方法如下

$$GDD_3 = \left(\sum_{i=1}^{24} G_{DH}_i \right) / 24 \quad (9)$$

4 实例分析

例 1: 某天日最高温度和日最低温度分别为 38.4 和 8.2 °C，当天对应作物所处阶段的上下限温度分别为 12.0 和 30.0 °C。

按日均温方法，该日的有效温度计算如下：

$$GDD_3 = \frac{0.6 + 3.8 + 7.4 + 11.3 + 15.2 + 15.2 + 11.3 + 7.4 + 3.8 + 0.6}{24} = 3.2 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

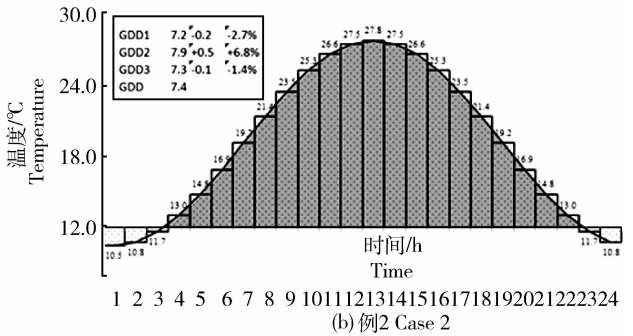
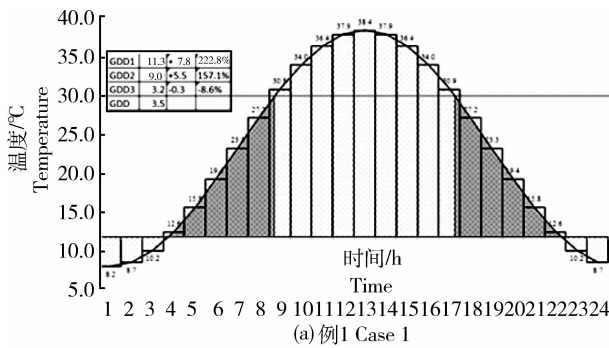


图 3 温度日变化曲线及不同模式日积温对比分析

Fig. 3 Diurnal temperature curve and comparison of GDD among methods

从该日的温度变化正弦曲线来计算，该天有 5.4 h 温度低于下限温度，8.6 h 温度高于上限温度，该日对作物生长发育有效的热量等于阴影部分的面积，通过正弦函数求积分等于 3.5 °C · d。

对比以上 3 种日积温方法得到的 GDD 与当日真实的有效积温差异可知：通过正弦模拟得到的时积温方法与实际值最接近，时积温得到的日积温比该日真实积温少 0.3 °C · d (低 8.6%)；日极值法则比真实积温多 5.5 °C · d (高 157.1%)；日均值法与真实积温相差最大，多 7.8 °C · d (高 222.8%)。

例 2: 作物所处阶段的上下限温度分别为 12.0 和 30.0 °C，某天日最高温度和日最低温度分别为 27.8 和 10.5 °C。

$$GDD_3 = \frac{1.0 + 2.8 + 4.9 + 7.2 + 9.4 + 11.5 + 13.3 + 14.6 + 15.5 + 15.8 + 15.5 + 14.6 + 13.3 + 11.5 + 9.4 + 7.2 + 4.9 + 2.8 + 1.0}{24} = 7.3 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

$$T_{avg} = \frac{8.2 + 38.4}{2} = 23.3 (\text{°C}),$$

$$GDD_1 = 23.3 - 12.0 = 11.3 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

按日极值方法，该日的有效温度计算如下：

$$T'_{avg} = \frac{12 + 30}{2} = 21.0 (\text{°C}),$$

$$GDD_2 = 21.0 - 12.0 = 9.0 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

按时积温方法，一天 24 h 中只有 10 h 温度处于对作物生长发育有效的范围内，该日的日积温数值为：

按日均温方法，该日的日积温计算如下：

$$T_{avg} = \frac{10.5 + 27.8}{2} = 19.2 (\text{°C}),$$

$$GDD_1 = 19.2 - 12.0 = 7.2 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

按日极值方法，该日的日积温计算如下：

$$T'_{avg} = \frac{12.0 + 27.8}{2} = 19.9 (\text{°C}),$$

$$GDD_2 = 19.9 - 12.0 = 7.9 (\text{°C} \cdot \text{d})$$

按时积温方法，该天 24 h 中有 5 h 温度低于下限，这 5 h 的温度对生长发育贡献为 0.0，有 19 h 温度处于对作物生长发育有效的范围内，该日的日积温计算如下：

从该日的温度变化正弦曲线来计算, 该天有 4.5 h 温度低于下限温度, 19.5 h 温度有效, 该日对作物生长发育有效的热量等于阴影部分的面积, 通过正弦函数求积分等于 $7.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

对比以上 3 种日积温方法得到的 GDD 与当日真实的有效积温差异为: 通过正弦模拟得到的时积温方法与实际值最接近, 时积温得到的日积温比该日真实积温少 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (低 1.4%); 日均值法比真实积温少 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (低 2.7%); 日极值法与真实积温相差最大, 多 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ (高 6.8%)。

5 结论与讨论

1) 积温是作物模型中生育期模拟的基础, 寻找准确计算积温的计算方法一直是国内外科技队伍不断探究的课题。因此, 目前国际上计算积温的方法很多。

2) 以生长发育对温度反应的线性假设为前提, 以日极端温度为日均温法、日极值法和时积温方法是目前国际应用最广泛的积温模型。本研究通过温度日变化曲线图解分析得出: 真实的日积温值可能被日均温法高估或低估, 日极值法则可能高估, 正弦模拟计算小时温度后的时积温方法相对准确的理论推断。

3) 实例研究发现: 日均温、日极值和时积温 3 种日积温计算方法中, 时积温与真实积温 GDD 相差最小, 因此, 为准确估算积温作者推荐采用时积温方法计算日积温。实例对比与理论推导都表明: 当温度日变化过程中出现有时高于上限或有时低于下限的情景时, 日均温方法可能导致日积温被高估或被低估, 而日极值法则导致日积温被高估。

4) 本研究对积温计算是基于上下限温度两基点的线性生长假设为前提条件的, 相对于三基点的生长假设还存在不足, 这也是积温计算方法中需要改进和深入的课题。

参 考 文 献

- [1] 郑大玮, 孙忠富. 关于积温一词及其度量单位科学性问题的讨论[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 165-169
- [2] McMaster G S, LeCain D R, Morgan J A, et al. Elevated CO₂ increases wheat CER, leaf and tiller development, and shoot and root growth[J]. J Agron Crop Sci, 1999, 183: 119-128
- [3] Neuheimer A B, Taggart C T. The growing degree-day and fish size-at-age: The overlooked metric[J]. Can J Fish Aquat Sci, 2007, 64: 375-385
- [4] Gelernter W D. Insect degree-day methods for turf[J]. Golf Course Manage, 1996, 1: 67-72
- [5] 齐维强, 张志斌, 邹志荣, 等. 基于积温的日光温室番茄生长发育规律研究[J]. 华中农业大学学报, 2004, 35(12): 53-57
- [6] Aiken R M. Applying thermal time scales to sunflower development[J]. Agron J, 2005, 97: 746-754
- [7] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop—The FAO crop method to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description[J]. Agron J, 2009, 101: 438-447
- [8] Aiken R M. Applying thermal time scales to sunflower development[J]. Agron J, 2005, 97: 746-754
- [9] Gregory S, McMaster W, Wilhelm W. Growing degree-days: one equation, two interpretations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 87: 291-300
- [10] Baskerville G L, Emin P. Rapid estimation of heat accumulation from maximum and minimum temperatures[J]. Ecology, 1969, 50: 514-517
- [11] Renwick R R. Evaluation of a crop simulation model for potatoes[D]. A thesis presented to the university of Manitoba for the degree of master of arts, in the department of geography, Winnipeg, Manitoba, Canada, 1999
- [12] 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2008
- [13] Schwartz M D, Carbone G J, Reighard G L, et al. A model to predict peach phenology and maturity using meteorological variables[J]. Hort Sci, 1997, 32(2): 213-216
- [14] Kreps T L. Crop yield response to drought in Alabama[D]. A thesis submitted to the graduate faculty of auburn university in partial fulfillment of the requirement for the degree of masters of science, Auburn, Alabama, USA, 2009
- [15] DeGaetano A T, Knapp W W. Standardization of weekly growing degree day accumulations based on differences in temperature observation time and method [J]. Agri For Meteorol, 1993, 66: 1-19
- [16] Qureshi Z A, Neibling H. Response of two-row malting spring barley to water cutoff under sprinkler irrigation [J]. Agric Water Manage, 2009, 96(1): 141-148
- [17] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U. S. Corn Belt: Impacts on yields, evapotranspiration and energy balance[J]. Agri For Meteorol, 2011, 151: 882-894
- [18] Rodr_guez-Rajo F J, Frenguelli G, Jato M V. Effect of air temperature on forecasting the start of the Betula pollen season at two contrasting sites in the south of Europe (1995 - 2001) [J]. Int J Biometeorol, 2003, 47: 117-125