

# 温度对夏玉米光合生产力影响的数值模拟研究\*

刘建栋 周秀骥

(中国气象科学研究院,北京 100081)

于 强

(中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

## 提 要

利用美国 Licor 6200 便携式光合作用仪测定了夏玉米光合作用速率,给出了叶片光合作用模型,建立了夏玉米冠层光温生产力数值模式,阐明了日平均气温与冠层群体光合作用之间的相对确定性关系,并提出了光合等效温度的概念及计算方法。在此基础上,推导出温度对群体光合作用影响的函数表达式,使温度订正函数  $f(T)$  不再是简单的假设,而是建立在较为严格的理论基础之上,从而实现了光合模型的时间尺度转换,为更准确地建立生态动力模型及农业气候资源数值模型提供了前提条件。

关键词:夏玉米 光合作用 温度订正函数 数值模拟

## 引 言

人口增长对食物的需求已远不能只靠扩大耕地面积来解决,提高单产,已经成为世界各国解决粮食生产问题的主要途径。作物单产潜力一直是国内外科学界广为探讨的一个重要课题,在中国,竺可桢<sup>[1]</sup>首先论述了气候与粮食生产之间的关系,黄秉维提出了光合生产潜力的概念<sup>[2]</sup>。当计算出光合生产潜力后,进一步计算光温生产潜力或气候生产潜力时,为了进行温度订正,不同学者提出了众多温度订正系数或函数<sup>[3]</sup>。进入 20 世纪 90 年代以来,国际上开始用数值方法研究农业气候资源,在中国,韩湘玲、吴连海等<sup>[4,5]</sup>首先运用数值模式对生产力进行了评价研究,王天铎等<sup>[6]</sup>则首次将数学模型应用于黄淮海地区进行生物资源评价,自此,中国地学界开始利用数值模拟方法研究不同地理区域各种作物的农业生产潜力<sup>[7-11]</sup>。近年来,随着多学科综合研究的逐步深入,作物数值模式开始与地球生物数值模式相耦合<sup>[12-14]</sup>,建立生态系统综合数值模式,其中温度订正仍然是模型中的关键影响因子之一。

迄今为止,包括传统统计模式或目前所运用的数值模式,往往是依据了作物光合作用三基点温度的概念建立温度订正函数,一个温度明确地对应于一个固定的订正系数。长期以来,人们尚没有对温度影响函数这一最基本的概念进行更进一步的探讨。实际上,由于一个确定的日平均气温值并不一定对应于一个固定的温度日变化过程,因而也就不一

\* 国家自然科学基金重大项目(49899270)及中国气象科学研究院博士后启动基金资助。

2000-10-24 收到,2001-08-05 收到修改稿。

定对应于一个确定的温度订正系数。本文将对此进行较为深入的探讨,以期在实验及理论基础,讨论温度对光合的影响,并在此基础上提出建立温度影响函数的理论方法,推导出黄淮海地区夏玉米的温度订正函数。

## 1 生产力模型的建立

### 1.1 气象资料的推算

#### (1) 辐射过程推算

一日中各时刻直接辐射强度  $S(\omega)$  和散射辐射强度  $D(\omega)$  可表示为<sup>[9,15]</sup>

$$S(\omega) = \frac{\pi(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)}{\tau(\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0)} \cdot S \quad (1)$$

$$D(\omega) = \frac{\pi(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega)}{\tau(\omega_0 \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0)} \cdot D \quad (2)$$

式中  $S$  为直接辐射日总量;  $D$  为散射辐射日总量;  $\varphi$  为地理纬度;  $\delta$  为赤纬;  $\tau$  为日长;  $\omega_0$  为日没时角。由此得到任一时刻直接光合有效辐射  $S^*(\omega)$  和散射光合有效辐射  $D^*(\omega)$

$$S^*(\omega) = 0.42 S(\omega) \quad (3)$$

$$D^*(\omega) = 0.53 D(\omega) \quad (4)$$

#### (2) 温度日变化的推算

将作物生长期从日出到次日日出定义为作物生长发育日,可以利用三次样条函数法<sup>[16]</sup>模拟温度日变化过程。样条函数插值可以保证各结点的拟合值与实际值相等,同时又保证各结点的光滑连接。对于一个作物生长发育日内全天温度的拟合,02:00、08:00、14:00、20:00 的温度位于固定结点,日最低气温一般出现在日出前 20 min 左右,最高气温一般出现在 14:00~15:00 左右。

### 1.2 冠层光合生产力模型

#### (1) 冠层光分布模式

在太阳光线  $n_s$  方向上  $G$  函数可表示为<sup>[17]</sup>

$$G(n_s) = G(h, A) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi_L \int_0^{\pi/2} g(\theta_L, \varphi_L) |\cos n_s n_L| \sin \theta_L d\theta_L \quad (5)$$

式中  $h$  为太阳高度角,  $A$  为太阳方位角,  $g(\theta_L, \varphi_L)$  为叶方位角为  $\varphi_L$ 、叶倾角为  $\theta_L$  的叶倾角分布函数,  $n_L$  为叶片法线方向的单位矢量,  $\cos n_s n_L$  为太阳光线方向和叶片法线方向夹角的余弦,可表示为

$$\cos n_s n_L = \sin h \cos \theta_L + \cos h \sin \theta_L \cos(A - \varphi_L) \quad (6)$$

直射光穿透函数  $\tau_s(L, n_s)$  和散射光穿透函数  $\tau_d(L)$  为

$$\tau_s(L, n_s) = e^{-L \cdot \frac{G(n_s)}{\sin h}} \quad (7)$$

$$\tau_d(L) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_s(L, n) \cos \theta \sin \theta d\theta d\varphi \quad (8)$$

其中  $\tau_s(L, n)$  为倾角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  所决定矢量方向的透过函数。 $\frac{G(n_s)}{\sin h}$  即是消光系数

$K$ , 当太阳高度角为  $h$ 、方位角为  $A$  时, 叶面积深度  $L$  处水平面直接光合有效辐射为

$$S^*(L, n_s) = S^*(\omega) \tau_s(L, n_s) \quad (9)$$

那么叶面积深度  $(L-1) \sim L$  层次内, 倾角为  $\theta_L$ 、方位角为  $\phi_L$  叶片上的直接光合有效辐射为

$$S^*(L-1, \theta_L, \phi_L) = \frac{S^*(L-1, n_s)}{\sin h} \cdot |\cos n_s n_L| \quad (10)$$

在太阳高度角  $h$ 、方位角为  $A$  时, 考虑了一次散射过程后的叶面积深度  $L$  处水平面散射光合有效辐射强度为

$$D^*(L) = D^*(\omega) \tau_d + \frac{Q^*(\omega) \sigma^* K(e^{-KL} - e^{-L})}{1 - K} \quad (11)$$

式中  $\sigma^* = (\rho^* + \tau^*)/2$ , 其中  $\rho^*$  为叶片光合有效辐射反射系数,  $\tau^*$  为叶片光合有效辐射透射系数, 根据各向同性的辐射理论, 在叶面积深度  $(L-1) \sim L$  层次内, 倾角为  $\theta_L$ 、方位角为  $\phi_L$  的叶片接收到的散射辐射量与叶方位角无关, 可以表达为

$$D^*((L-1) \sim L, \theta_L, \phi_L) = D^*(L-1) \cdot \frac{(1 + \cos \theta_L)}{2} \quad (12)$$

### (2) 作物叶片光合作用模式

肥力及管理措施适宜状况下的叶片光合作用模式可以表示为<sup>[4,18]</sup>

$$\left\{ \begin{aligned} P_n &= P_z - R_d = \frac{aI + \beta C - \sqrt{(aI + \beta C)^2 - 4\theta(aI\beta C)}}{2\theta} \cdot F(T) - R_d \\ F(T) &= \frac{2(T+B)^2(T_{\max}+B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} \\ R_d &= R_m + R_g \\ R_m &= r_m \cdot DM \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}} \\ R_g &= (1 - CVF) \cdot (P_z - R_m) \end{aligned} \right. \quad (13)$$

式中  $P_n$  为净光合速率;  $P_z$  为总光合速率;  $a$  为初始光合速率;  $\beta$  为最大光合速率参数;  $\theta$  为凸度;  $C$  为  $\text{CO}_2$  浓度;  $I$  为光合有效辐射光子通量密度;  $F(T)$  为温度影响函数;  $T$  为气温;  $B$  为温度订正函数中的温度影响廓线参数;  $R_d$  为暗呼吸速率;  $R_m$  为维持呼吸速率;  $R_g$  为生长呼吸系数;  $r_m$  为维持呼吸系数;  $DM$  为干物重;  $Q_{10} = 2$  为呼吸商;  $CVF$  为初始光合产物的转换。

### (3) 日光温生产力

将太阳时角  $\omega$  时刻, 叶面积深度  $L$ 、叶倾角  $\theta_L$ 、叶方位角  $\phi_L$ 、叶片上的光合有效辐射  $Q^*(\omega, L, \theta_L, \phi_L)$  代入单叶光合作用模式中得到此时叶片净光合作用速率  $P_j(\omega, L, \theta_L, \phi_L)$ , 那么对时角  $\omega$  时进行积分, 得到日光温生产力为

$$Pz(\omega) = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P_j(\omega, L, \theta_L, \phi_L) \times P(L, \theta_L, \phi_L) d\theta_L d\phi_L dL d\omega \quad (14)$$

式中  $-\omega_0$ 、 $\omega_0$  分别为日出时角和次日日出时角;  $P(L, \theta_L, \phi_L)$  为叶面积深度  $L$  处、倾角为  $\theta_L$ 、方位角为  $\phi_L$  的叶面积密度值, 本文为保证其计算精度, 对叶面积深度进行逐层

积分,叶倾角、方位角分别划分为 6 个区域和 8 个区域进行积分。

## 2 光合等效温度定义及计算方法

### 2.1 光合等效温度的定义

上述模式尺度为瞬时状态,一定的光、温对应确定的光合速率,所计算的光合生产力可以做为标准值。但是气候资源模拟中一般至多可以得到日平均气温,平均气候状况下的 02:00、08:00、14:00、20:00 最高、最低气温值则往往无法得到。因此模式用于光温生产力研究时,受资料限制,不得不利用日平均气温对日光合生产力进行订正,得到日光温生产力。

那么由此产生一个问题:对于某一确定的辐射日变化过程,可以存在多种温度日变化过程与之匹配,例如一日中温度一直保持光合作用最适温度  $T_0$ ,或白天温度一直保持光合作用上限温度  $T_h$ ,夜间一直保持光合作用下限温度  $T_l$ ,并且日平均气温也为  $T_0$ 。显然,尽管两者的日平均气温相同,但日光温生产力会有非常大的差异。因此,同一个日平均气温值由于可以对应不同的温度日变化过程,可能对应于不同的日光温生产力。

因此,当模式积分步长不是瞬时状况,而是 1d 或更大时,利用日平均温度对日光合生产力进行温度订正并不是一种绝对确定的关系。国内外的数值模式,积分步长大多为 1d,但迄今为止尚未对这种温度的非确定性影响进行过深入探讨。

设日光温生产力为  $P_W$ ,日光合生产力为  $P_G$ ,那么

$$P_W = P_G \cdot F(T_0) - R_d \quad (15)$$

温度订正函数  $F(T_0)$  仍采用公式(13)中的函数形式。那么显然,对光合作用而言, $T_0$  是与实际温度日变化过程产生同样光温生产力的一个恒定温度,定义  $T_0$  为光合等效温度。

### 2.2 光合等效温度的计算方法

上面逐时积分模式,具有很强的理论基础,得到验证后,利用逐时辐射及逐时温度值,可以计算出  $P_W$  做为标准值。然后对上述模型中的温度变化过程不予考虑,即温度一直保持最适状况,得到  $P_G$ ,那么式(15)中仅  $T$  是未知量,进行非线性迭代,其计算结果即是  $T_0$ 。显然用  $T_0$  对日光合生产力进行温度订正所得到的日光温生产力,与考虑了温度日变化过程的光温生产力相等。

将当日的  $T_0$  值与当日平均温度  $\bar{T}$  进行比较,并建立起  $T_0$  与  $\bar{T}$  之间的数学模型,那么即可由日平均气温换算出光合等效温度,进而求出温度订正系数。

## 3 参数确定及光合等效温度的计算

### 3.1 实验场地及研究方法

实验在山东农业大学农学系试验农场内进行,采用大口径培养盆,于 1999 年 6 月 18 日播种,品种为目前黄淮海地区高产栽培界一致认为生产潜力较高的夏玉米当家品种掖单 13 号,每盆播种 3 粒,苗期结束时定苗。培养盆内夏玉米水、肥、管理均非常适宜。在 8 月 18 日利用 Licor-6200 便携式光合作用测定仪测定了叶片的光合生理等指标, Licor-

6200 光合测定仪每次可以同时采集光合作用强度、温度、光合有效辐射光子通量密度、CO<sub>2</sub> 浓度等多项指标贮存在机内芯片中形成一个数据文件,大量测定后一次打印全部输出,通过纱布遮光测定光强渐变时夏玉米叶片光合速率变化过程。

### 3.2 参数确定

代入实测数据利用非线性迭代法求解,得到黄淮海地区水肥适宜状况下的夏玉米叶片光合作用模式

$$\begin{cases}
 P_n = \frac{\alpha I + \beta C - \sqrt{(\alpha I + \beta C)^2 - 4\theta(\alpha I \beta C)}}{2\theta} \cdot \frac{2(T+B)^2(T_{\max}+B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} - R_d \\
 R_d = R_m + R_g \\
 R_m = r_m \cdot DM \cdot \frac{T - T_m}{Q_{10}^{10}} \\
 R_g = (1 - CVF) \cdot (P_z - R_m)
 \end{cases} \quad (16)$$

模式中:  $\alpha = 0.081$ ;  $\beta = 0.18121$ ;  $\theta = 0.8$ ;  $T_{\max} = 33\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $B = 0$ ;  $r_m = 60.125 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $CVF = 0.7$ ;  $Q_{10} = 2.0$ 。

利用抛物线法确定出掖单 13 号夏玉米不同叶面积分布密度函数见表 1,掖单 13 号为典型的紧凑型夏玉米品种,叶倾角大多分布在 45°~90°之间。

表 1 玉米倾角的叶面积分布密度

叶面积深度	叶 倾 角					
	0°~15°	15°~30°	30°~45°	45°~60°	60°~75°	75°~90°
0~1	0.045	0.043	0.066	0.127	0.312	0.408
0~2	0.058	0.057	0.076	0.137	0.326	0.347
0~3	0.066	0.076	0.110	0.156	0.338	0.255
0~4	0.057	0.069	0.109	0.202	0.363	0.201
0~5	0.050	0.063	0.099	0.197	0.405	0.187

### 3.3 模型的验证

首先利用不同土壤湿度状况下的叶片光合作用速率实测值对叶片光合作用模型进行

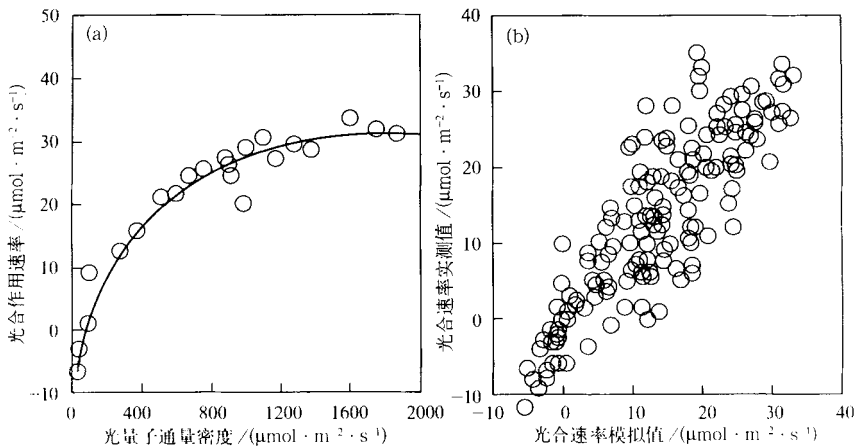


图 1 夏玉米叶片光合作用模型的验证

(a) 光-光合曲线模拟; (b) 对 206 组实测资料的验证

了验证,在样本数  $n = 206$  的情况下相关系数达到 0.86,通过极显著检验,表明在实测基础上建立的叶片光合作用模式是具有较高准确度的(见图 1)。

利用 GXH-305 红外线  $CO_2$  分析仪外接  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 120\text{ cm}$  同化箱测定了夏玉米冠层光合速率随  $CO_2$  浓度变化过程,采用此资料对冠层光合作用进行验证,结果表明:冠层光合速率随  $CO_2$  浓度变化模拟值与实测值基本是一致的,当  $CO_2$  浓度  $< 600 \times 10^{-6}$  时模拟效果较好,总体平均相对误差  $\frac{1}{N} \times \frac{|\text{实测值} - \text{模拟值}|}{\text{实测值}} = 6.93\%$ 。

### 3.4 光合等效温度的计算结果

将气象月报中的济南地区 1982~1985 年 8 月份的逐日气象资料(包括日直接辐射量、日散射辐射量,02:00、08:00、14:00、20:00 及最高、最低温度值)输入模型进行计算,首先计算出日光温生产力  $P_w$  做为标准值,然后将模型中的温度因子进行归一化处理,即不考虑温度的影响,得到日光合生产力  $P_G$ ,对式(15)进行非线性迭代,即得到逐日光合等效温度值。图 2 是光合等效温度与日平均气温的相关图,由此可以看出光合等效温度并不等同于日平均气温,有时两者之间甚至存在较大的差异。

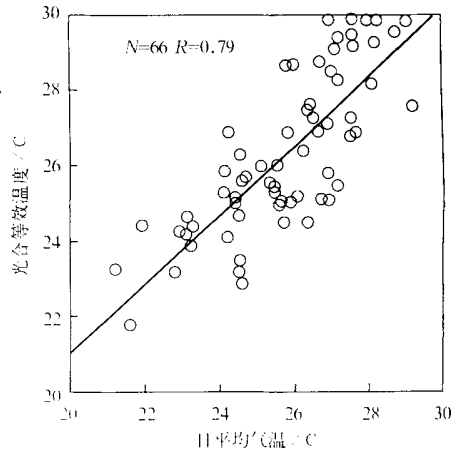


图 2 光合等效温度与日平均气温的关系

实际上,由于同一个日平均气温可以对应多种不同日变化过程,因而就可能对应于多个光合等效温度值,日平均气温与光合等效温度间表现为一种非确定性关系;但反过来讲,一个确定地区的气候条件是特定的,其气象因子变化服从一定统计规律,所以对于同一日平均气温而言,其日变化过程虽然并不完全相同,但是绝不会产生一种完全杂乱无章的浑沌效应,这又使得光合等效温度与日平均气温之间具有一定的相关性,即具有一定的确定性,也就是说光合等效温度与日平均气温之间存在一种较明显的线性关系(20~30 °C之间),可拟合为:

$$T_0 = 0.91 \times T + 2.8 \quad (20\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 30\text{ }^\circ\text{C}) \quad (17)$$

拟合效果通过 0.01 的相关显著性检验。由图 2 可以看出,总体来讲,  $T_0$  高于  $\bar{T}$ ,这是由于当日平均气温在 20 °C ~ 30 °C 范围内时,一般中午时刻气温就会达到 30 °C ~ 35 °C 左右,而玉米恰好是一种喜温  $C_4$  作物,其光合作用适宜温度在 33 °C 左右,因此中午温度与光合适宜温度接近,加之一般状况下中午太阳辐射较强,必然有利于提高日总光合量,所以总体来讲光合等效温度要高于日平均气温值,这应当是可以理解的。需要说明的是:由于线性拟合,存在光合等效温度随日平均气温升高而加大的现象,这在温度远低于 20 °C 或远高于 30 °C 的一些极端情况下是不成立的,然而改用非线性拟合,无法通过显著性检验。应当注意到夏玉米生长旺季日平均气温大于 30 °C 或低于 20 °C 的情况极少,因此上式虽然给定了温度的适用范围,但实际超出这种约束条件的情况是非常少见的,即使在极个别的天数出现,也不会对总体效果产生多大影响,因而运用此式在夏玉米生长旺季用

日平均气温推算光合等效温度,进而求算温度订正系数是可行的。

### 3.5 黄淮海地区夏玉米光合作用温度影响函数

综合以上研究,在农业气候资源评价研究中,夏玉米温度订正函数可以表示为

(1) 对于任意时刻(瞬时状况),温度对夏玉米光合影响函数为

$$F(T) = \frac{2(T+B)^2(T_{\max}+B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} \quad (18)$$

式中  $T_{\max} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $B = 0$ 。

(2) 对于以日为时间步长的资源评价模型而言,夏玉米温度影响函数可以表示为

$$F(T_0) = \frac{2(T_0+B)^2(T_{\max}+B)^2 - (T_0+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} \quad (19)$$

式中  $T_{\max} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $B = 0$ ,  $T_0$  为光合等效温度,可表示为

$$T_0 = 0.91 \times \bar{T} + 2.8 \quad (20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \bar{T} \leq 30\text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (20)$$

所以可用日平均气温  $\bar{T}$  推算温度影响函数

$$F(\bar{T}) = \frac{2(0.91 \times \bar{T} + 2.8 + B)^2(T_{\max}+B)^2 - (0.91 \times \bar{T} + 2.8 + B)^4}{(T_{\max}+B)^4} \quad (21)$$

应当指出:当时间步长由瞬时 scaling up 到 1 d 为单位时,也可以理解为  $T_{\max}$  和  $B$  值会相应发生改变,因而似乎可以将日平均气温直接代入式(15),利用  $P_W$ 、 $P_G$  和  $\bar{T}$  迭代出  $T_{\max}$  和  $B$ ,但是对于一个方程而言,同时迭代出两个参量是根本无法实现的,因而这也从一个反面说明本文提出光合等效温度,进而利用光合等效温度严格推导出日光温生产力温度订正函数的必要性。

## 4 讨论与结论

(1) 利用美国 Licor-6200 光合作用测定仪对黄淮海地区夏玉米光合作用进行了测定,在实测资料基础上建立了光合作用模型,并进而建立了一个日光温生产力逐时模型,为更精确地建立生态动力模型及农业气候资源数值模型提供了理论基础。

(2) 提出了光合等效温度的定义,并在此基础上,论述了以日为单位计算光温生产力时,日平均气温对生产力影响的确定性与非确定性关系,给出了以日为单位计算生产力中的温度影响函数,将有助于改进美国 DNDC 等生态动力模型以及 CERES 等农业气候资源数值模型。

(3) 本文所建立的温度影响函数,不同于以往的简单假设,具有较严格的推导过程和大量实测资料的支持。但是应当看到,模型毕竟是现实系统的简化,不可避免地带有一定的局限性,包容一切而无需进一步改进。探讨的模型是根本不存在的。文中所给出的是黄淮海地区夏玉米生长旺季温度订正函数,其他生长阶段夏玉米叶片光合作用特性与该时期存在较大差异,因而无法合并研究。本文首次给出了光合等效温度的定义及计算方法,在此基础上,确定夏玉米其它生长阶段以及其它作物的温度影响函数,清楚地揭示等效光

合温度与平均温度间的内在关系,这些都有待进行深入的研究。

### 参 考 文 献

- 1 竺可桢.论我国气候的几个特点及其与粮食生产的关系.地理学报,1964,30(1):1~13.
- 2 黄秉维.中国农业生产潜力—光合潜力.见:中国科学院北京农业生态系统试验站编.农业生态环境研究.北京:气象出版社,1989.17~24.
- 3 欧阳海,郑步忠编著.农业气候学.北京:气象出版社,1990.154~193.
- 4 韩湘玲主编.作物生态学.北京:气象出版社,1991.115~130.
- 5 吴连海,韩湘玲.冬小麦生产力估算方法研究.自然资源学报,1991,6(1):80~87.
- 6 王天铎,王琦,陈家麟.数学模拟在黄淮海地区生物资源评价中的应用.见:刘昌明主编.中国水问题研究.北京:气象出版社,1996.191~197.
- 7 刘建栋,傅抱璞,金之庆.应用 ARID CROP 模型对中国黄淮海地区冬小麦气候生产力的数值模拟研究.自然资源学报,1997,12(3):282~287.
- 8 刘建栋,傅抱璞,林振山.冬小麦光合生产潜力数值模拟.地理研究,1998,17(1):56~65.
- 9 刘建栋,于强,傅抱璞.黄淮海地区冬小麦光温生产力数值模拟研究.自然资源学报,1999,14(2):169~174.
- 10 于强,陆佩玲,刘建栋.作物光温生产力模型及南方水稻适宜生长期的数值分析.自然资源学报,1999,14(2):163~168.
- 11 刘建栋,周秀骥,于强.FAO生产潜力模型中基本参数的修正.自然资源学报,2001,16(3):240~247.
- 12 Liu Jiandong, Zhou Xiujie and Zhang Yu. Numerical simulation of methane emissions from rice paddy fields in the Yangtze Delta of China. ACTA METEOROLOGICA SINICA, 2001, 15(1): 1~11.
- 13 刘建栋,周秀骥,于强.长江三角洲稻田  $\text{CH}_4$  及  $\text{N}_2\text{O}$  排放规律的数值模拟.自然科学进展,2001,11(9):1~6.
- 14 刘建栋,周秀骥,王建林.稻田  $\text{CH}_4$  排放的农业气象数值模拟.应用气象学报,2001,12(4):409~418.
- 15 刘建栋,于强,吴乃元.大豆晴天群体光合作用农业气象数值模拟.应用气象学报,2001,12(1):14~20.
- 16 Liu Jiandong, Fu Baopu and Jin Zhiqing. An agrometeorological model of physiological thermal Index for winter wheat development in early stage. ACTA METEOROLOGICA SINICA, 1997, 11(4): 503~512.
- 17 蒙特思 J L 主编.植被与大气—原理.卢其尧等译.北京:农业出版社,1985.15~67.
- 18 索恩利著.植物生理的数学模型.王天铎译.北京:科学出版社,1983.107~129.

## SI MULATION OF I MPACTS OF TEMPERATURE ON PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY OF SUMMER MAIZE

Liu Jiandong Zhou Xiujie

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Yu Qiang

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing 100101)

### Abstract

A combined model is established for simulating photosynthesis of summer maize based on the data observed with Li-6200. Validation of the canopy photosynthesis model by the data observed with GHX-305  $\text{CO}_2$  Analyzer is conducted. The result shows that the mean error of the model is about 6.93%. The impact of temperature on summer maize photosynthetic productivity is derived by the model, which provides the premise for improving numerical models of climatically productive potential of summer maize in the Huanghuaihai Region.

**Key words:** Summer maize Photosynthesis Temperature correction function Numerical model