

遥感信息结合植物光合生理特性 研究区域作物产量水分胁迫模型^{*}

张佳华 符淙斌

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

王长耀

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要 首先给出利用遥感信息结合作物光合生理特性研究作物产量水分胁迫模型的一般性概念, 然后论述作物产量水分胁迫模型中作物蒸散和光合作用的关系。建立以作物蒸散为显参的作物产量水分胁迫模型; 对模型的参数给出求解公式, 利用遥感信息反演模型参数。最后利用发展的作物产量水分胁迫模型对华北平原典型区进行作物产量填图, 将本模型与作物产量经验模型的 1997 年计算结果进行比较, 发现本文发展的模型有可比的精度。

关键词: 作物产量模型; 遥感; 蒸散; 华北平原

1 引言

在利用遥感信息建立作物光合产量模型时, 一般考虑的仅是水分适宜的条件下的作物产量, 即水分供应充足, 对作物生长发育不构成水分胁迫。然而在华北地区作物生长生育的全过程, 经常会受到水分亏缺的影响, 进而影响作物的光合速率和产量。建立估测作物产量的水分胁迫模型可以更准确地反映作物生育期积累有机质的状况。在建立该模型时, 将同时考虑与作物生长发育相关的地表热量平衡、水量平衡、热传导方程、光合作用反馈模型等, 因此需考虑的参数较多, 国内外在这方面的研究也不深入, 特别是基于遥感信息获取参数建立作物产量受水分影响的模型更显缺乏。本文着重论述在这一领域的探讨。

2 作物产量水分胁迫模型的一般性概念

设 P_n 表示未受水分、温度及病虫害胁迫下, 以光合有效辐射 (PAR) 为限制因子的作物光合速率。则 P'_n 表示在此之上作物在整个生育期内同时受到水分胁迫的光合速率。由 P'_n 与光合作用时间和光合面积的乘积 (即为作物光合同化势, 由 P_{CPA} 表示) 建立的估测作物产量水分胁迫模型, 再利用遥感获取信息计算作物水分胁迫光合速率和作

1998-11-17 收到, 1999-05-07 收到再改稿

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043400“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”、863 计划-308 主题以及国家自然科学基金资助项目 39900084 共同资助

物光合同化势, 然后建立起的作物产量模型, 称为估测作物产量的水分胁迫模型。

3 蒸散对作物光合作用影响及计算

作物产量是作物光合作用所生产有机物的量。整个生长季作物的光合作用均有水分参与, 在作物生长过程中, 光合作用和作物蒸腾作用是密不可分的两个过程。光合作用原料 CO_2 通过气体扩散从外界输送到作物体内。当作物气孔张开时, 其体内的水分蒸腾所需的 CO_2 进入作物; 而当气孔关闭时, 水分蒸腾和 CO_2 进入作物体内的过程即告停止。因此作物光合作用的强度与作物气孔开闭的程度, 也即与作物的蒸腾量有关。光合作用直接影响作物的干物质的积累, 所以作物蒸腾量可间接度量作物的生长和产量, 也可更准确地确定作物的产量。在研究作物蒸腾作用时一般从蒸散角度来考虑的 (即包括作物蒸腾和土壤蒸发)。水分胁迫对作物植株光合作用的影响, 不同程度地降低了植株的光合速率。蒸散的计算通常采用 Penman-Monteith (P-M) 公式^[1]。该公式将冠层和地表当作一层, 即“大叶”看待, 引入冠层表面阻力, 冠层表面阻力即包含植物生理因子, 又包含非植物生理因子, 是反映植物层水分汽化过程所受阻碍的综合因子。

3.1 以蒸散为显参的作物产量水分胁迫概念模型

近年来, 通过遥感信息研究作物蒸散的工作逐渐开展起来。Reicosky 利用遥感信息研究冬小麦冠层温度、光合作用和蒸散^[2]。Carlson 提出了一种计算每日蒸散的简单方法^[3]。Choudhury 认为利用彭曼公式便于潜在蒸散研究^[4]。本文将在前人研究蒸散的基础上, 利用遥感信息求取作物的潜在蒸散和实际蒸散, 其概念模型如图 1 所示。

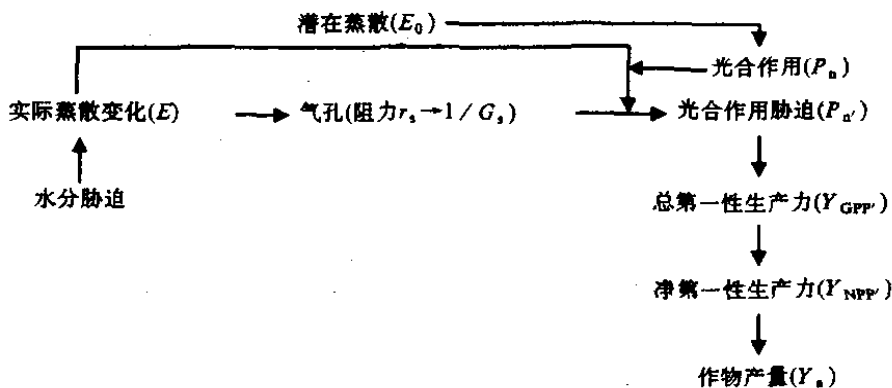


图 1 基于蒸散为显参的作物产量水分胁迫的概念模型

3.2 建立以蒸散为显参的作物产量水分胁迫模型

影响光合作用的水分因素, 可通过实际蒸散和潜在蒸散的相关性加以求取。本文在遥感-光合生物量机理模型基础上^[5], 建立不同生育期光合速率(P'_n)受水分影响的模型。由 P'_n 与光合同化势的乘积表示水分胁迫对作物产量的影响。

蒸散量可作为受环境影响而减产的变量。当实际蒸散量等于潜在蒸散量时, 作物达到最高产量。实际蒸散量低于潜在蒸散量时, 作物产量下降^[6]。在研究作物实际产量和最高产量中, 我们注意到 Y_m 实际上是水分供应充足时的产量, 而产量又由光合面积、

光合时间和光合强度所决定。在实际产量 Y_a 中则表示受水分影响光合速率的下降, 与光合势及产量转换系数的乘积。这样便可假定: P_n 为水分供应充足时的光合速率 (单位: $g\ m^{-2}\ d^{-1}$), 此时 $E = E_0$; P'_n 为水分缺乏时的光合速率 (单位: $g\ m^{-2}\ d^{-1}$), 此时 $E < E_0$ 。如果能求出 P'_n , 则其与 P_{CPA} 及产量转换系数的乘积即为水分胁迫下作物产量(Y_a)。

设 K_p 表示作物光合速率反应因子, 可以表示为

$$K_p = \frac{1 - P'_n / P_n}{1 - E_j / E_{0j}} \tag{1}$$

不同作物及作物的不同发育期对水分敏感是不同的, 所以 K_p 也不相同。表 1 列出冬小麦生长发育期光合速率响应因子 K_p 。

表 1 冬小麦各生长发育期光合速率响应因子 K_p

生长发育期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	开花期	成熟期
K_p	0.2	0.2	0.6	0.2

从式(1)得

$$P'_n = P_n [1 - K_p (1 - E_j / E_{0j})] \tag{2}$$

式(1)和(2)中, t 时刻光合速率 P 表达式为

$$P = \frac{\alpha A_t P_{\max}}{\alpha A_t + P_{\max}} \tag{3}$$

光合日总量为

$$P_n = \int_0^{h_d} \frac{\alpha A_t P_{\max}}{\alpha A_t + P_{\max}} dt \tag{4}$$

式(4)中, h_d 为日照时数 (单位: h), P 为光合速率 (单位: $g\ m^{-2}\ h^{-1}$), α 、 $P_{\max}$ 分别为光初始利用效率和最大光合速率, A_t 为 t 时刻的吸收光合有效辐射 (APAR)。

现考虑冬小麦各生育期的光合速率受水分影响的模型:

(1) 返青—拔节期

$$P'_{n1} = P_{n1} [1 - 0.2(1 - E_1 / E_{01})] = P_{n1} (0.8 + 0.2 \times E_1 / E_{01}), \tag{5}$$

(2) 拔节—抽穗期

$$P'_{n2} = P_{n2} [1 - 0.2(1 + E_2 / E_{02})] = P_{n2} (0.8 + 0.2 \times E_2 / E_{02}), \tag{6}$$

(3) 开花期

$$P'_{n3} = P_{n3} [1 - 0.6(1 - E_3 / E_{03})] = P_{n3} (0.4 + 0.6 \times E_3 / E_{03}), \tag{7}$$

(4) 成熟期

$$P'_{n4} = P_{n4} [1 - 0.2(1 - E_4 / E_{04})] = P_{n4} (0.8 + 0.2 \times E_4 / E_{04}). \tag{8}$$

则全生育期冬小麦作物产量水分胁迫模型可表示为

$$Y_{GPP'} = P_{CAP1} \times P'_{n1} + P_{CAP2} \times P'_{n2} + P_{CAP3} \times P'_{n3} + P_{CAP4} \times P'_{n4}$$

$$= \sum_{i=1}^4 P_{CAP,i} \times P'_{n,i}, \quad i=1, 2, 3, 4, \quad (9)$$

$$Y_{NPP'} = (1 - R_d) \times Y_{GPP'}, \quad (10)$$

$$Y_a = Y_{GPP} \times f(\xi), \quad (11)$$

$f(\xi)$ 表示经济系数、水分等综合影响产量转换系数, 根据文献[7], 本文取 $f(\xi)=0.14$; P_{CPA} 表示光合同化势, 是单位土地面积上作物群体的叶面积与持续时间的乘积(单位: m^2/m^2)。 $Y_{GPP'}$ 是受水分影响的作物总光合量, $Y_{NPP'}$ 是受水分影响的总光合量与呼吸消耗的差, R_d 为呼吸消耗的比率, Y_a 为受水分胁迫影响的作物产量。

3.3 作物产量水分胁迫模型的各参数求取

3.3.1 P_n 的求算

依式(4), P_n 的求算涉及日照时数 h_d , 光初始利用效率 α , 最大光合速率 P_{max} 和 t 时刻吸收光合有效辐射 A_t 等。

(1) 任一时刻 A_t 的求算

首先计算每日吸收光合有效辐射(A_{PAR}), 以 A 表示^[8]。

$$A = R_{PA} \times R_{FAPA}, \quad (12)$$

其中, R_{PA} 为日光合有效辐射, R_{FAPA} 为吸收光合有效辐射函数,

$$R_{PA} = \eta Q; \quad (13)$$

Q 为日总辐射量(由气象资料获得); η 为太阳总辐射中 R_{PA} 所占比例。进一步分析给出冬小麦各生育期的 η 值^[9], 列于表2。

表2 冬小麦各生长发育期的 η 值

生长发育期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	开花期	成熟期
η	0.44	0.44	0.49	0.48

由式(12), 任一时刻 A_t 可表示为

$$A_t = R_{PA,t} \times R_{FAPA}. \quad (14)$$

模拟过程中, 光合有效辐射日变化近似用正弦曲线表示^[10]:

$$R_{PA,t} = \frac{2R_{PA}}{h_d} \sin^2\left(\frac{\pi t}{h_d}\right), \quad (15)$$

合并式(14)和(15), 则可计算任一时刻的 A_t 。

(2) R_{FAPA} 的计算

依 Sellers^[11],

$$R_{FAPA} = \frac{(I_{NDV} - I_{NDV,min})(R_{FAPA,max} - R_{FAPA,min})}{I_{NDV,max} - I_{NDV,min}}, \quad (16)$$

式中, $I_{NDV,min}$ 和 $I_{NDV,max}$ 分别对应作物覆盖度为5%和98%时的标准化差值植被指数(I_{NDV}), 本文分别确定为-0.001和0.5。 $R_{FAPA,max}$ 表示最大的 R_{FAPA} , 取为0.95;

$R_{FAPA, \min}$ 表示最小的 R_{FAPA} , 取为 $0.001^{[11]}$ 。

(3) 不同生长发育期 α 、 $P_{\max}$ 的取值

表 3 给出不同生长发育期的 α 、 $P_{\max}^{[12]}$ 取值

表 3 不同生长发育期中 α 、 $P_{\max}$ 取值

生长发育期	拔节	抽穗	开花	成熟
$P_{\max} / (\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1})$	8.14	7.5	8.68	7.84
$\alpha / [(\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}) / (\text{J m}^{-2} \text{h}^{-1})]$	9.2×10^{-6}	4.8×10^{-6}	6.6×10^{-6}	1.8×10^{-6}

(4) 日照时数 h_d 的计算

日照时数 h_d 可由下式计算:

$$\sin h = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi, \tag{17}$$

式中, h 为太阳高度角, δ 为太阳赤纬($\delta = -\frac{234}{180} \pi \cos \left[T + \frac{10}{365} \right]$, T 为自 1 月 1 日起的天数, 可从天文年历中查出); ω 为时角, 当太阳在子午面时 (正午) 为 0, 一日之中变化为 2π ; φ 为地理纬度。当日出日落时 $h=0$, 即可获得日出日落时间, 其差即为日照时数 h_d 。若考虑日晴朗系数, 则 $h'_d = \text{晴朗系数} \times h_d$ 。

3.3.2 作物蒸散求算

Brown 和 Rosenberg 根据能量平衡及作物阻抗原理提出了作物阻抗—蒸散模型^[13]。依冠层—空气温度差估算作物蒸散的一般原理和能量平衡原理^[14,15],

$$\frac{LE}{LE_0} = \frac{E}{E_0} = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)}, \tag{18}$$

其中, E 为实际蒸散 (单位: J m^{-2}), E_0 为潜在蒸散 (单位: J m^{-2}), 本文设 E / E_0 为作物系数 $f(w)$; r_a (空气动力学阻抗) 一项分为 r_{ac} 和 r_{bh} , 其中 r_{ac} 为修正空气动力学阻抗 (单位: s mm^{-1}), r_{bh} 为剩余阻抗 (单位: s mm^{-1}); r_c 为作物冠层阻抗 (单位: s mm^{-1}); $\Delta = (e_c^* - e_a^*) / (T_c - T_a)$, 为饱和水汽压对温度的斜率 ($\text{hPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), 其中 e_c^* 为冠层温度为 T_c 下的饱和水汽压 (单位: Pa), e_a^* 为空气温度为 T_a 下的饱和水汽压 (单位: Pa); γ 为干湿表常数 (单位: $\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$)。

3.3.3 作物系数各参数求取

式 (18) 中各参数的求取包括冠层阻抗 (r_c)、冠层温度 (T_c)、空气动力学阻抗 (r_a) 等。

(1) Δ 的求算^[14]

$$\Delta = \frac{24630.93}{(235 + T_a)} \times 10^{\frac{7.45T_a}{235 + T_a}}. \tag{19}$$

(2) 冠层阻抗 r_c 的计算

Choudhury 推导小麦作物冠层阻力 r_c 的计算公式^[16]

$$r_c = \frac{1000[1 + (\psi_L / 231)^{55}]}{I_{LA} + 0.025R_v}, \tag{20}$$

其中 $R_v = f_c \times R_n$, f_c 为冠层覆盖度, R_n 为净辐射(单位: J m^{-2}), R_v 为冠层净辐射(单位: J m^{-2}), I_{LA} 为叶面积指数(L_{AI}), ψ_L 为作物水势(单位: hPa)。

(3) 冠层温度 T_c 的求算

依 Kerr, 冠层温度 T_c 可表示为如下^[17]:

$$T_c = -2.44 + 3.6T_4 - 2.6T_5, \quad (21)$$

A_4 ($10.3 \sim 11.3 \mu\text{m}$), T_5 ($11.5 \sim 12.5 \mu\text{m}$) 为 NOAA-AVHRR 第 4、5 通道亮温, 由此可求出 T_c 。

(4) 作物覆盖度 f_c 的计算

根据文献[18], 确立

$$f_c = (I_{NDV} - I_{NDV, \min}) / (I_{NDV, \max} - I_{NDV, \min}), \quad (22)$$

$I_{NDV, \max}$ 和 $I_{NDV, \min}$ 同前。

(5) 标准化差值植被指数 (I_{NDV}) 的计算

$$I_{NDV} = \frac{r_{CH2} - r_{CH1}}{r_{CH2} + r_{CH1}},$$

r_{CH1} 和 r_{CH2} 分别为 NOAA-AVHRR 第一通道 ($0.58 \sim 0.68 \mu\text{m}$) 和第二通道 ($0.725 \sim 1.10 \mu\text{m}$) 半球空间反射率。

(6) 叶面积系数的计算

依照文献[19], 本文采用冬小麦 I_{LA} 计算方法为

$$I_{LA} = K^{-1} \times \ln(1 - f_c)^{-1}, \quad (23)$$

f_c 为作物覆盖率, K 为作物群体的消光系数, 本文取返青前 $K=0.28$, 返青后 $K=0.35$ ^[20]。

(7) 净辐射 R_n 的计算

$$R_n = R_s \downarrow - R_s \uparrow + R_L \downarrow - R_L \uparrow = (1 - r)R_s \downarrow + \varepsilon_a \sigma T_a^4 - \varepsilon_s \sigma T_s^4, \quad (24)$$

$R_s \downarrow$ 为入射的短波辐射(单位: J m^{-2}), $R_s \uparrow$ 为反射的短波辐射(单位: J m^{-2}), $R_L \downarrow$ 为来自大气的长波辐射(单位: J m^{-2}), $R_L \uparrow$ 为地表发射的长波辐射(单位: J m^{-2}), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-9} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; r 为反照率, 对于 NOAA 卫星, r 与 NOAA-AVHRR 第一通道反射率(r_{CH1})和第二通道反射率(r_{CH2})的关系^[21]为

$$r = (0.0168r_{CH1} + 0.1012r_{CH2} + 16.83) / 100; \quad (25)$$

$\varepsilon_a \sigma T_a^4$ 为大气长波辐射(单位: J m^{-2}), ε_a 为空气比辐射率, 计算如下:

$$\varepsilon_a = 1.24(e_a / T_a)^{1/7}, \quad (26)$$

e_a 为气温 T_a 下的实际水汽压(单位: hPa), T_a 为气温; $\varepsilon_s \sigma T_s^4$ 为地表长波辐射, ε_s 为地表热红外比辐射率, 计算如下^[22]:

$$\varepsilon_s = 1.0094 + 0.047 \ln I_{NDV}. \quad (27)$$

(8) 剩余阻抗 r_{bh} 的计算

陈镜明^[23]从植物小气候原理出发, 提出了“剩余阻抗”的概念。 r_{bh} 为热量传输对应于动量传输的剩余阻抗, 其量级与 r_a 相当。 r_{bh} 由下式计算^[24]:

$$r_{bh} = 4 / u^*, \tag{28}$$

u^* 为摩擦风速 (m s^{-1})。

(9) 摩擦风速 u^* 的计算

u^* 由下式给出^[24]:

$$u^* = \kappa u / \ln[(z - d) / z_0]. \tag{29}$$

式中 κ 是卡曼常数 (取为 0.4), d 、 z_0 分别为零平面位移和粗糙度 (单位: m), u 是冠层高度 z 处风速 (单位: m s^{-1})。

(10) 10 m 风速与 2 m 风速的关系

气象台站得到的都是 10 m 的风速, 而在计算空气动力学阻抗 r_a 时用得是 2 m 的风速, 因此, 必须找出 10 m 风速和 2 m 风速的关系, 其关系如下式^[25]:

$$u_{(10)} = 5^{1/7} u_{(2)}. \tag{30}$$

(11) 作物高度 z 的求算

求算小麦高度的经验公式^[19]为

$$z = 9.30(L_{AI} / f_c) - 0.23. \tag{31}$$

(12) 修正空气动力学阻抗 r_{ac} 的计算

在中性层结下, 空气动力学阻抗为

$$r_a = [\ln(z - d) / z_0]^2 / \kappa^2 u, \tag{32}$$

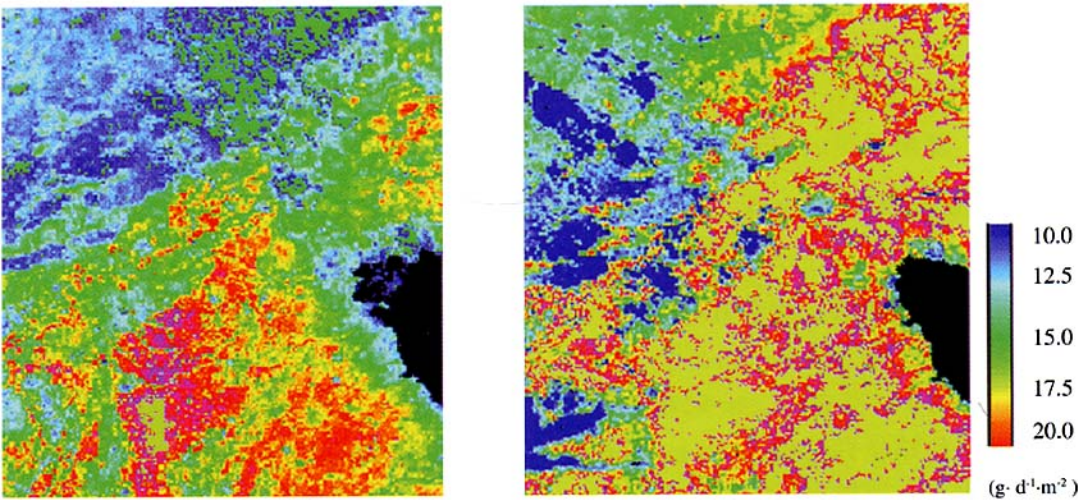
式中 κ 、 u 、 d 、 z_0 的定义同前, d 、 z_0 可分别以作物高度 z 的 0.67 倍和 0.13 倍的关系来计算^[14]。对于非中性层结, 需对 r_a 进行订正。谢贤群改进了 Monteith 订正式, 订正形式如下^[26]:

$$r_{ac} = r_a + \frac{\varphi_H r_a}{u^* k} = r_a \{1 + \varphi_H / \ln[(z - d) / z_0]\}, \tag{33}$$

式中 φ_H 为热量层结稳量度函数, 形式如下:

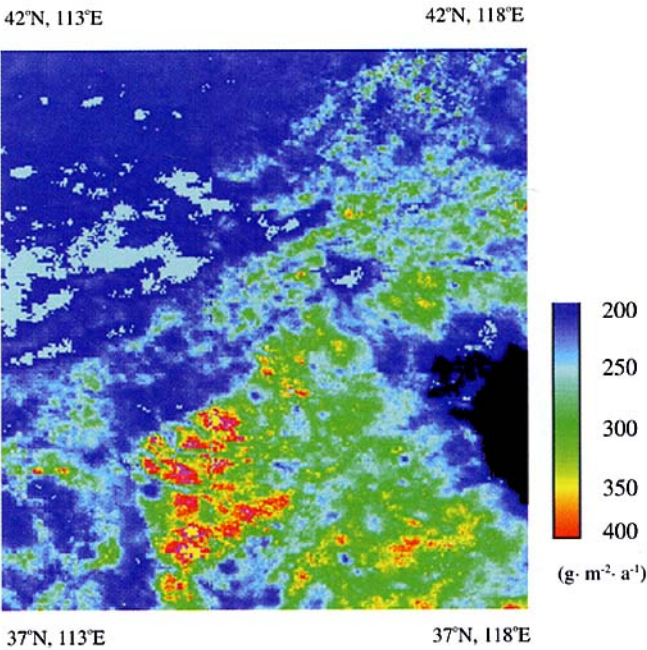
$$\varphi_H = \begin{cases} \left(1 - 16 \frac{z - d}{L}\right)^{1/2}, & \frac{z - d}{L} < -0.03 & \text{不稳定} \\ \left(1 + n \frac{z - d}{L}\right), & \begin{cases} -0.03 < \frac{z - d}{L} < 0 \\ \frac{z - d}{L} > 0 \end{cases} & \begin{matrix} \text{微弱不稳定} \\ \text{稳定} \end{matrix} \end{cases} \tag{34}$$

n 为经验常数, $(z - d) / L < 0$ 时, $n = 4.5$; $(z - d) / L > 0$ 时, $n = 5.2$ 。 L 是莫宁-奥布霍夫特征长度 (单位: m), 其表达式为



经计算的1997年4月冬小麦水分胁迫光合速率 经计算的1997年5月冬小麦水分胁迫光合速率

图 2 由模型计算的不同发育期受水分胁迫的冬小麦光合速率



经作物产量水分胁迫模型计算的1997年研究区冬小麦产量分布图

图 3 由产量水份胁迫模型计算的冬小麦产量分布

$$L = \frac{u^* T_0}{k \cdot g(T_2 - T_1) / (u_2 - u_1)}, \tag{35}$$

其中 $T_0 = 273 + T_a$, g 是重力加速度 ($g = 9.806 \text{ m s}^{-2}$), u^* 为摩擦风速 (单位: m s^{-1}), T_1 、 T_2 、 u_1 、 u_2 分别为两个高度的温度与风速, 若 $T_1 = T_c$, 则 $u_1 = 0$.

3.4 计算结果成图

从冬小麦生育期中选取返青—拔节期、拔节—抽穗期、开花期、成熟期, 利用公式 (2)和(5)~(8), 分别求代表返青—拔节期受水分胁迫的光合速率、拔节—抽穗期受水分胁迫的光合速率、开花期受水分胁迫的光合速率和成熟期受水分胁迫的光合速率 (见图 2).

式 (9) 和 (11) 为作物整个生育期产量水分胁迫模型 (简称 RSPWBM), 其中 Y_{GPP} 模型中光合同化势的计算是从返青—收获的全生育期求取. 我们将从 1997 年 3~6 月对冬小麦监测 NOAA-AVHRR 卫星的数据中选取 4 个典型生育期的 NOAA-AVHRR 的 Channel 1、Channel 2、Channel 4、Channel 5 数据, 同时将代表典型生育期的气象资料获得. 通过式 (9) 和式 (11), 计算研究区水分胁迫下的冬小麦产量, 将结果成图 (见图 3).

基于蒸散为显参的作物光合速率水分胁迫模型对华北平原典型地区冬小麦各生育期光合速率受水分胁迫估算结果表明, 1997 年华北平原典型地区各生育期的光合速率平均下降了 50% 以上, 4、5 月份华北地区中南部受干旱影响, 其光合速率的相对变率有不同程度的增加, 反映水分对作物光合速率的影响. 由作物产量水分胁迫模型计算的冬小麦光合产量受水份胁迫的结果表明, 估算的冬小麦产量值变动范围在 $200 \sim 400 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 在研究区域大致划分为 4 部分, 中南部平均值在 $300 \sim 400 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右; 西南部在 $200 \sim 300 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右, 西北部为 $200 \sim 250 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 东北部为 $200 \sim 300 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右.

选择产量受水分胁迫模型 (用 Y_1 表示) 计算的 10 个样点与利用经验模型^[27] (定为 Y_2 , 它 是 被 FAO 采 用 的 精 度 较 高 的 估 测 区 域 作 物 产 量 的 模 型) 计 算 的 该 区 域 10 个 样 点 进 行 比 较, 样 点 图 见 图 4, 它 表 示 两 模 型 在 典 型 区 冬 小 麦 产 量 估 算 的 样 点 比 较. 从 图 4 可 见 同 一 样 点 的 离 散 程 度 较 小, 表 明 利 用 遥 感 信 息 结 合 作 物 光 合 生 理 特 性 所 发 展 的 估 测 冬 小 麦 产 量 水 分 胁 迫 模 型 有 可 比 精 度.

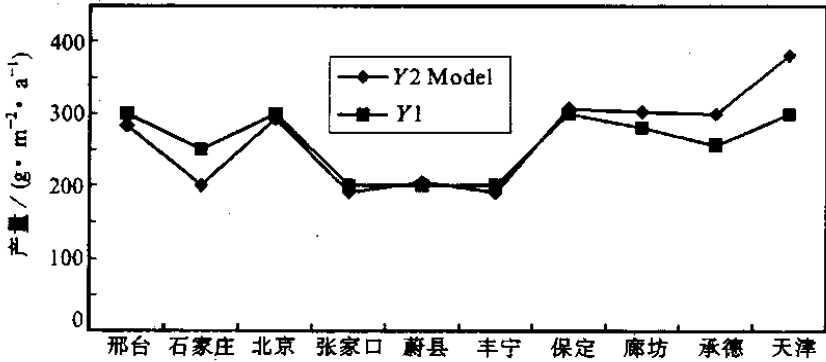


图 4 产量水分胁迫模型 Y_1 与 Y_2 经验模型在典型区冬小麦产量计算结果比较

4 结语

在全球变化研究中,对陆地植被生态系统生物量的研究是了解碳循环和陆-气相互作用的重要内容;而作物产量的多少又将直接影响人类的物质来源。全面地了解植被生物量历程、影响因素和监测、预测方法,建立区域和更大范围的估产模型是十分必要的。但又要注意到生物量研究有其复杂性和不确定性,其影响因子来自于多个方面,模型构建多样化,特别是利用空间遥感信息反演陆面过程参数进而构建大面积、动态监测生物量的机理模型存在更大的难度。

本文在遥感估测作物光合产量的模型基础上,引入多变量的植物生理和微气象参数,修正遥感估产的光合受控机理模型;提出了水分胁迫作物产量模型的一般性概念,阐述蒸散对光合速率的影响;建立以蒸散为显参的 RSPWBM 模型,将模型应用于典型区域的冬小麦受水分胁迫的作物产量估测研究中,并绘制成图。结果表明,冬小麦各生育期受水分影响其光合速率下降较多。

用发展的模型计算冬小麦产量的范围为 $200 \sim 400 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,对区域 10 个样点进行比较,表明发展的模型和经验模型在典型区冬小麦产量估算的样点比较中,同一样点的离散程度较小。

本文在区域范围内建立的作物产量水分胁迫估测模型,可对陆地生态系统第一性生产力和海洋生物量的研究,以及为作物估产的精度提高提供可资借鉴的方法。本文只初步探讨了作物产量受水分影响的情况,而对其他因子如温度、肥料等未及进一步考虑;模型仍需要不断完善,而且需要与更多的实际资料对比。

参 考 文 献

- 1 Penman, H. L., Natural evaporation from open water bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. (London)*, 1948, 193(A), 120~145.
- 2 Reicosky, D. C., P. W. Broun and M. S. Moran, Diurnal trends in wheat canopy temperature, photosynthesis, and evapotranspiration, *Remote Sens. Environ.*, 1994, 49, 235~245.
- 3 Carlson, Tiby N., William J. Capehart, and Roert R. Gillies, A new look at the simplifies method for remote sensing of daily evapotranspiration, *Remote Sens. Environ.*, 1995, 54, 161~167.
- 4 Choudhury, B. J., Global pattern of potential evaporation calculated from the Penman-Monteith equation using satellite and assimilated data, *Remote Sens. Environ.*, 1997, 61, 64~81.
- 5 张佳华、符淙斌, 生物量估测模型中遥感信息与植被光合参数的关系研究, *测绘学报*, 1999, 28(2), 128~132.
- 6 裴步祥编著, 蒸发和蒸散的测定与计算, 北京: 气象出版社, 1980.
- 7 欧阳海、郑步忠、王雪娥等, 农业气候学, 北京: 气象出版社, 160~172.
- 8 Dye Dennis G., Monitoring global energy flow to primary production, *Proceedings of the International Symposium on Vegetation Monitoring*, August, Chiba, Japan, 1995, 79~86.
- 9 周允华、项月琴、李俊等, 一级生产水平下冬小麦、夏玉米的生产模拟, *应用生态学报*, 1997, 8(3), 257~262.
- 10 谢贤群, 遥感瞬时作物表面温度估算农田全日蒸散总量, *环境遥感*, 1991, 6(4), 253~261.
- 11 Sellers, P. J., Tucker, C. J., Collatz, G. J. et al., A global 1 by 1 degree NDVI data set for climatic studies. Part 2: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI, *Int. J. of Remote Sens.*, 1994, 15(17), 3519~3545.

- 12 郑有飞、颜景义、万长建等, 小麦作物光合生产模拟研究, 南京气象学院学报, 1995, 18(4), 567~571.
- 13 Brown, K. W., Resenberg, H. T., A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beetfield, *Agron. J.*, 1985, 65, 341~347.
- 14 李付琴, 植被条件下遥感监测土壤水分的方法探讨—田间实验部分, 田国良主编, 黄河流域典型地区遥感动态研究, 北京: 科学出版社, 1990, 151~159.
- 15 李韵珠等, 作物干旱指数 (CWSI) 和土壤干旱指数 (SWSI), 土壤学报, 1995, 32(2), 202~209.
- 16 Choudhury, B. J., Idso, S. B., and Reginato, R. J., Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature-based energy balance equation, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1987, 39(4), 283~297.
- 17 Kerr, Y., Corrections thermiques dans l'infrarouge thermique: Cas de l'AVHRR, in: Proc. 5th Coll. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Sp 319, ESA, Paris, 1991, 29~34.
- 18 Otte, C. and D. Vidal-madjar, Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX-MOBILHY region, *J. Hydrology*, 1994, 158, 241~264.
- 19 张仁华, 实验遥感模型及地面基础, 北京: 科学出版社, 1996, 96~244.
- 20 杨春虹, 农田小麦光合生产力模拟与分析, 农田作物环境实验研究, 北京: 气象出版社, 1990, 193~203.
- 21 Van de Griend, A. A. and Owe, M., On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces, *Int. J. Remote Sens.*, 1993, 14, 1119~1131.
- 22 田国良, 黄河流域典型地区遥感动态研究, 北京: 科学出版社, 1990, 161~176.
- 23 陈镜明, 现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进, 科学通报, 1988, 6, 454~457.
- 24 隋洪智、田国良、李付琴, 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用, 遥感学报, 1997, 1(3), 220~224.
- 25 邓根云, 水面蒸发量的一种气候学计算方法, 气象学报, 1979, 34(1), 28~40.
- 26 谢贤群, 测量农田蒸散量的几种微气象方法, 中国农业小气候研究进展 (中国农业气象研究会农业小气候专业委员会主编), 北京: 气象出版社, 1993, 59~75.
- 27 高素华, 中国东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策研究, 北京: 气象出版社, 1995, 36~69.

A Study of Region Crop Yield Model Influenced by Water Deficit Based on Remote Sensing Information and Crop Photosynthetic Physiological Characteristic

Zhang Jiahua and Fu Congbin

(Global Change Research Center for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Wang Changyao

(Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract Crop water deficit is an important sensitive factor affecting crop evapotranspiration, crop photosynthetic rate and hence its yield. In this study, first the concept model of crop yield influenced by water deficit is analyzed. Then the developed model is established based on the remote sensing information from NOAA-AVHRR, in combination with crop photosynthesis characteristics and meteorological data. The crop evapotranspiration is recognized as the explicit parameter in the formula, the partial parameters used to calculate crop photosynthesis and crop yield for the developed models are derived from remote sensing information. Third the distribution of estimating winter wheat yield in the North China Plain had been shown using the developed model. The calculated results had been compared between the developed model and the former model in the same region, and it is found that the developed model (RSPWBM) has a relatively better precision.

Key words: crop yield estimating model; remote sensing information; evapotranspiration; North China Plain