

冬小麦光合生产潜力数值模拟^{*}

刘建栋 傅抱璞 林振山 卢其尧

(南京大学大气科学系 南京 210008)

摘 要 利用中国小麦生态实验资料建立了黄淮海地区冬小麦发育阶段模式和光合作用、呼吸作用等模式,由这些子模式连结成为一个可以模拟瞬时光合作用的,充分考虑了叶片空间分布特征的冬小麦光合生产潜力模式。运用该模式研究结果证明冬小麦光合生产潜力与抽穗前10天至成熟期辐射量相关性最大。黄淮海地区冬小麦光合生产潜力可达到800 kg/亩~1 000 kg/亩,与牛文元计算结果相近。功率谱分析结果表明北京地区光合生产潜力存在3年~4年和9年~10年的变化周期。此外,文中还给出了CO₂升高后冬小麦光合生产潜力的可能变化情况。

关键词 冬小麦 光合生产潜力 气候资源 数值模拟 黄淮海地区 CO₂倍增

分 类 中图法 S162.5

太阳辐射是决定农业生产潜力的首要因子,当大田中CO₂浓度保持目前正常水平,在温度、水分、肥力条件适宜时,作物的生产力称为光合生产潜力。

估算光合生产潜力,是研究农业生产潜力的基础。过去由于计算手段所限,传统的计算方法多用统计方法^[1~3]。采用一个系数乘以太阳总辐射作为光合生产潜力,这种方法使用简便,可以大致反映光能资源的数量,但考虑作物本身生物特性不够,因而有时会有一些偏差。此外,传统方法计算光合生产潜力时,所乘系数往往取平均状态值,有时难以符合作物本身的生理特性,如冬小麦光合生产潜力计算时系数取平均温度为25℃左右的系数,但如整个生长期全部为25℃,则冬小麦无法通过春化作用而最终无产量可言。作物生长最适温度是动态变化的,各发育阶段不同,传统方法计算光合生产潜力时没有考虑这一因子,因而不能完全符合光合生产潜力的定义。

本文在总结了前人统计模式的基础上^[1~3],借鉴了国内外地理学、农学、气象学、生物学等领域的最新研究成果^[4~6],建立了一个光合生产潜力数值模拟模型,模型运行时,考虑了冬小麦生长中叶面积动态增长过程及最适温度变化过程。

1 模型的建立

1.1 辐射模型

模型运行时,需要用到一地区逐日逐时直接辐射值和间接辐射值,本文首先介绍逐日辐射值的求算方法,然后在此基础上反演出一天中任一时刻辐射值。

^{*} 国家教委“跨世纪人才基金”资助项目

收稿日期:1996-06-04,收到修改稿日期:1997-03-04

1.1.1 逐日辐射的求算 目前仅有部分辐射观测台站记录直接辐射及散射辐射日总量, 常规气象台站一般只有云量和日照百分率的观测, 部分有辐射观测的台站也仅记录直接辐射或散射辐射日总量, 为了在生产潜力数值模拟中输入日辐射因子, 著名生产力数值模拟学家 C. T. de Wit 及 van Keulen 等建议运用埃斯屈朗方程由日照百分率等换算近似得到逐日日辐射量^[7], 但由于该式仅将系数分为全球的几个区域, 应用于中国局部地区估算日总辐射量会带来一定的误差。实际上, 用完全类似的方法, 中国气候学者已经就适用于中国的辐射经验公式进行了不少研究工作, 本文参照 de Wit 等的方法^[7] 并采用以下公式近似计算逐日的直接太阳辐射日总量 S 和散射辐射日总量 D :

$$S = a + bQ_0s \quad (1)$$

$$D = a + bQ_0n \quad (2)$$

式中 Q_0 为天文辐射量; s 为日照百分率; n 为云量; a, b 为因地区而变的系数, 并用高国栋等系数分布图^[8] 内插出计算地区的数值。关于 Q_0 可用以下公式计算:

$$Q_0 = \frac{I_0\tau}{\pi r^2}(\omega \sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \cos\omega) \quad (3)$$

式中 I_0 为太阳常数; τ 为日长; r 是以日地平均距离为单位的日地距离; ψ 为地理纬度; $\omega = \arccos(-\tan\psi \tan\delta)$ 为日没时角; δ 为太阳赤纬, 左大康^[9] 利用 Fourier 分析给出了赤纬 δ 与日期的经验关系。设一年中 365 天对应区间 $[0, \pi]$, 取日角 $\theta = 2\pi(d_n - 1)/365$, d_n 为年的日序, 1 月 1 日取为 1, 12 月 31 日为 365, 则:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006\,894 - 0.399\,512\cos(\theta) + 0.072\,075\sin(\theta) - 0.006\,799\cos(2\theta) \\ & + 0.000\,896\sin(2\theta) - 0.002\,689\cos(3\theta) + 0.001\,516\sin(3\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

1.1.2 辐射日变化的推算 有了直接辐射日总量 S 和散射辐射日总量 D , 就可反推直接辐射和散射辐射的日变化, 即一天中任一时刻 t 的 $S(t)$ 和 $D(t)$, 设实际直接辐射、散射辐射日总量与天文辐射日总量之比 (即晴朗指数) 为 C_s 和 C_D , 对一天中的各时刻为 $C_s(t)$, $C_D(t)$, 即 $C_s = S/Q_0$, $C_D = D/Q_0$, $C_s(t) = S(t)/Q_0(t)$, $C_D(t) = D(t)/Q_0(t)$, 则:

$$S = C_s Q_0 \quad (5)$$

$$D = C_D Q_0 \quad (6)$$

$$S(t) = C_s(t) Q_0(t) \quad (7)$$

$$D(t) = C_D(t) Q_0(t) \quad (8)$$

这里 Q_0 由 (3) 式表示, $Q_0(t)$ 可用下式表示:

$$Q_0(t) = \frac{I_0}{r^2}(\sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \cos\omega) \quad (9)$$

式中 ω 为太阳时角。将式 (7), (8) 分别除以式 (5), (6) 并代入 Q_0 和 $Q_0(t)$ 的表达式后, 可得到

$$S(t) = \frac{C_s(t)}{C_s} \frac{\pi(\sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \cos\omega)}{\pi(\omega \sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \sin\omega)} S \quad (10)$$

$$D(t) = \frac{C_D(t)}{C_D} \frac{\pi(\sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \cos\omega)}{\pi(\omega \sin\psi \sin\delta + \cos\psi \cos\delta \sin\omega)} D \quad (11)$$

对于散射辐射来说, $C_D(t)$ 与 C_D 相差不大, 可以视为近似相等。对直接辐射, $C_s(t)$ 与 C_s 虽

有一定的偏差,特别是由于云量出现的随机性会破坏直接辐射变化的规律,产生一些随机偏差,但随着日数的增加,这种偏差对作物光合生产力模拟的影响将会由于互相抵消作用而减少。为计算方便起见,我们仍可假定 $C_s(t)$ 也与 C_s 近似地相等。这样,若令 $C_D(t) = C_D$, $C_s(t) = C_s$, 则(10)和(11)可近似地写为:

$$S(t) = \frac{\pi(\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\pi(\omega\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\sin\omega)} S \quad (12)$$

$$D(t) = \frac{\pi(\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\cos\omega)}{\pi(\omega\sin\psi\sin\delta + \cos\psi\cos\delta\sin\omega)} D \quad (13)$$

利用以上二式计算各时刻的辐射值,可使模拟值的日总量与实际值相等,而模拟的辐射过程与天文辐射一致,基本符合实际情况。

1.2 作物生理模型

1.2.1 小麦发育阶段模式 冬小麦发育速度主要依赖于温度和日长,本文参考作物非线性积温模型^[10]并考虑日长的影响,得到以下模拟模型:

$$V = \frac{dM}{dt} = a_0 + a_1 \exp[b(DL - DL_0)] + A_2(T - T_{\min})^{1+P}(T_{\max} - T)^{1+Q} \quad (14)$$

式中 V 为发育速度, T 为日平均气温, DL 为日长, $DL_0 = 12$ hr 为光照临界日长, T_{\min} 、 T_{\max} 分别为不同发育阶段发育速度的下限温度和上限温度。小麦的感光性和感温性随生育期而改变,当抽穗以后,感光性为零,令 $DL = DL_0$, 且当 $T = T_{\min}$ 或 $T = T_{\max}$ 时,令 $\frac{dM}{dt} = 0$, 表明温度限制了作物的生长。据有关研究^[11],小麦不同发育期的下限温度和上限温度分别为:抽穗以前下限温度 3, 上限温度 32, 抽穗以后下限温度 9, 上限温度 35, 模式待定参数的求解方法是,设小麦发育期为 n 天,对模型逐日积分得:

$$\begin{aligned} \int_1^n \frac{dM}{dt} dt = 1 = & n a_0 + a_1 \sum_{i=1}^n [\exp(b(DL_i - DL_0))] \\ & + a_2 \sum_{i=1}^n [(T_i - T_{\min})^{1+P}(T_{\max} - T_i)^{1+Q}] \end{aligned} \quad (15)$$

在给定 b 、 P 、 Q 时,用多元线性回归可拟合 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(T_i)$ 、 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(DL_i)$ 与 $\frac{1}{n}$ 的关系,得出参数 a_0 、 a_1 、 a_2 值。对 b 、 P 、 Q 值进行调整,使得

$$S = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{n_j} - [a_0 + a_1/n_j \sum_{i=1}^{n_j} f(DL_i) + a_2/n_j \sum_{i=1}^{n_j} f(T_i)] \right\}^2 \quad (16)$$

趋向最小值,即达到最优拟合效果。其中 j 表示播期序、 i 表示发育期日序。

发育速度对时间的积分为小麦发育阶段 DVS :

$$DVS = \int_0^{n(t)} V dt \quad (17)$$

式中 V 为逐日发育速度,积分下限 0 表示开始播种, $n(t)$ 为播种后任一天的生长日数。因而此式可以模拟生育期任一天的 DVS 值, DVS 值表示完成发育天数占总发育天数的比例。

根据全国小麦生态实验研究资料(1982~1985)^[12],品种为冀麦 7 号,采用了其黄淮海地区及华北部分地区各年 10 月 8 日左右播种的实验资料,可以建立冬小麦发育速度的统一

模式为:

$$V = 2.3412 \times 10^{-03} + 1.2099 \times 10^{-03} \times e^{0.3(DL - DL_0)} + 1.62 \times 10^{-07} \times (T - T_{\min})^{(1.0+0.93)} (T_{\max} - T)^{(1.0+0.14)} \quad (18)$$

($n = 27, R = 0.9319168$, 通过信度 0.01 的显著性检验)

模拟结果表明 DVS 值相对稳定, DVS 指标分别为: 出苗 0.03, 三叶 0.07, 拔节 0.70, 抽穗 0.88, 开花 0.89, 成熟 1.0; 利用黄淮海地区资料检验平均误差为 3.6 天。

1.2.2 冠层叶面光分布模式

(1) 直射光 对于给定叶层, 直射光消光系数 K_s 是太阳高度角 h 和方位角 A 的函数。直射光与叶片矢量 $r(\alpha, \beta)$ (α, β 分别为叶片的倾角和方位角) 的夹角是:

$$\theta(\alpha, \beta) = \cos^{-1}[\sinh \cos \alpha + \cosh \sin \alpha \cos(A - \beta)] \quad (19)$$

当 $\theta > \pi/2$ 时表示直射光照在叶片背面。对于叶倾角相等, 叶向均匀分布的叶层, 直射光消光系数为:

$$K_s(h) = \begin{cases} \cos \alpha & \alpha = h \\ \cos \alpha [1 + 2(\tanh r - r)/\pi] & h < \alpha < \pi/2 \\ 2 \cosh r / \pi & \alpha = \pi/2 \end{cases} \quad (20)$$

式中 $r = \cos^{-1}(\csc \alpha \sinh \alpha)$, 故而此时平均直射光消光系数为:

$$K_s(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g_i K_{si}(h) \quad (21)$$

式中 g_i 是第 i 种倾角叶面积密度, 第 i 层水平面太阳直射光强度为:

$$S_s(i) = S_0 \exp[-K_s LAI(i-1)] \quad (22)$$

式中 S_0 为水平面直射辐射, $LAI(i-1)$ 是第 $i-1$ 层的叶面积深度, 是叶丛上方至第 $i-1$ 层的累积叶面积指数值。则叶面平均太阳直射光强为:

$$S(\alpha, \beta, h, A) = [S_s(i) / \sinh] |\cos \theta(\alpha, \beta, h, A)| \quad (23)$$

(2) 散射光 据研究, 冬小麦散射光消光系数一般在 0.5 左右^[9], 第 i 层水平面散射光强度为:

$$D(i) = D_0 \exp[-K_D LAI(i-1)] \quad (24)$$

据非水平面各向同性的散射辐射模式, 第 i 层叶面散射辐射强度为:

$$D(\alpha) = D(i) \left[\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right] \quad (25)$$

1.2.3 光合作用与呼吸作用模式

(1) 单叶光合作用

$$P_L(Q_{PAR}) = P_{\max} [1 - \exp(-X Q_{PAR} / P_{\max})] \quad (26)$$

式中 $P_L(Q_{PAR})$ 为叶面总光合速率, Q_{PAR} 为叶面光合有效辐射, X 为光-光合作用曲线的初始斜率。 P_{\max} 是 $Q_{PAR} \rightarrow$ 时 $P(Q_{PAR})$ 的渐近值, 本文取 $X = 15 (\text{g CO}_2 \cdot \text{MJ}^{-1})$, $P_{\max} = 3.5 (\text{g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$ ^[13]。

(2) 群体光合速率 根据前面介绍的任一时刻各层各方位各倾角叶面光强的计算模式, 可以算出散射光强与直射光强, 周允华^[14]曾对中国光合有效辐射与直接辐射和散射辐射之间的关系进行了深入探讨, 据此可近似得到光合有效辐射量为:

$$Q_{PAR} = 0.42S_0 + 0.56D_0 \tag{27}$$

值得注意的是作物生长发育最适温度并非叶片光合的最适温度，叶片光合速率受到温度的胁迫，需要进行订正，这里采用根据三基点温度与光合作用的关系建立的以下隶属函数式^[15]：

$$TF = \begin{cases} 0.063t - 0.006 & 0 \leq t < 16 \\ 1.00 & t = 16 \sim 18 \\ 1.495 - 0.0275t & 18 < t \leq 40 \end{cases} \tag{28}$$

将 (27) 式代入光合作用模式 (26) 式，同时考虑到温度的影响，然后积分，即得到日总光合量 P_z ：

$$P_z = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} \int_0^L \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} P_L(Q_{PAR}, \alpha, \beta) \cdot p(\alpha, \beta) \cdot TF d\alpha d\beta dL d\omega \tag{29}$$

式中 L 叶面积深度， P_L 为单位叶面积光合速率， $p(\alpha, \beta)$ 为叶面积随倾角 α 、方位角 β 的分布密度，其值如下^[16]：

表 1 不同发育阶段 DVS 的叶倾角分布密度 P

Tab. 1 Area density of leaf inclination of winter wheat in different development stage

$DVS \backslash \alpha$	5 °	15 °	25 °	35 °	45 °	55 °	65 °	75 °	85 °
拔节	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.11	0.13	0.20	0.22
灌浆	0.10	0.12	0.16	0.13	0.16	0.13	0.085	0.075	0.04
成熟	0.12	0.10	0.11	0.10	0.06	0.13	0.12	0.20	0.06

(3) 呼吸作用 净光合速率 P_n 可表示为

$$P_n = P_z - R_d \tag{30}$$

式中 P_z 是总光合速率， R_d 为暗呼吸。

暗呼吸分为生长呼吸 R_g 与维持呼吸 R_m 两部分，研究表明：

$$R_d = R_g + R_m, \quad R_g = r_g P_z \tag{31}$$

式中 $r_g = 0.05$ (gc02/gc02)，为生长呼吸系数。维持呼吸与温度有关，可表示为

$$R_m = r_m Q_{10}^{\frac{T - T_m}{10}} DM \tag{32}$$

式中 $r_m = 0.0001 \text{ gc02} / (\text{g 干重} \cdot \text{hr})$ ，是叶子在常温 T_m 下维持呼吸的平均强度， $Q_{10} = 2$ ，为温度系数， DM 为作物干物重^[13]。故群体日净光合量 P_j 为：

$$P_j = (P_z - R_{md} - R_{mg}) r_R \tag{33}$$

式中 R_{md} 和 R_{mg} 分别为日维持呼吸量和日生长呼吸量。 $r_R = 0.68$ ，为 CO_2 转化为碳水化合物的转换系数。

1.2.4 衰老模式 作物存在随 DVS 而产生的自然死亡和温度、水分胁迫造成的死亡^[17]，de Wit 试验结果为 $DVS = 0.0$ ，干物质自然死亡率 $SW = 0.0$ ， $DVS = 0.5$ 开始至成熟， $SW = 0.001$ ， $DVS = 0$ 和 0.5 之间的 SW 用线性内插得出。

1.2.5 物质分配模式 日净光合物的分配系数随发育阶段 DVS 而变化 (表 2)^[4]。

表 2 不同发育阶段 DVS 干物质分配 F

Tab. 2 Distribution of dry matter in different development stage

F\发育阶段	三叶	拔节	抽穗	开花	成熟
根茎	0. 60	0. 68	0. 70	0. 58	0. 30
叶	0. 40	0. 32	0. 25	0. 12	- 0. 02
穗	0. 00	0. 00	0. 05	0. 30	0. 72

由此可以确定第 i 日根茎、叶、穗干物重的日增量: $\Delta GJGZ(i)$ 、 $\Delta YGZ(i)$ 和 $\Delta SGZ(i)$; 那么第 i 日根茎、叶、穗的干物重为:

$$\begin{cases} GJWZ(i) = \sum_{j=1}^i [GJGZ(j) \cdot CVF - GWZ(j-1) \cdot SW] \\ YGZ(i) = \sum_{j=1}^i [YGZ(j) \cdot CVF - GWZ(j-1) \cdot SW] \\ SGZ(i) = \sum_{j=1}^i [SGZ(j) \cdot CVF - GWZ(j-1) \cdot SW] \end{cases} \quad (34)$$

$GWZ(i-1)$ 为第 $i-1$ 日的干物重, $GWZ(i) = GJWZ(i) + YGZ(i) + SGZ(i)$, CVF 为 CH_2O 转化为干物重的转换系数, 本文取 $CVF = 0.75^{[6]}$

1. 2. 6 叶面积指数增长模式 总叶面积与植株总干重之比为叶面积比率 B , 它的大小表示出植物体内光合物质和呼吸物质的比例关系, 其值随发育阶段 DVS 而变化^[5], 返青、拔节、抽穗、开花和乳熟这不同发育阶段的 B 值分别为: 71. 7、62. 7、44. 9、35. 4 和 14. 9。由叶面积比率和当时的干物重即可换算出当时的叶面积指数。

2 模型的应用

2. 1 利用北京地区 1957 年~1985 年逐日直射辐射及散射辐射资料对冬小麦的光合生产潜力进行模拟, 模拟时以 10 月 1 日为播种期, 其逐日气温随发育阶段而变化, 一直保持最适状态^[11] (图 1)。光合生产潜力与抽穗前 10 日—成熟期总辐射的相关系数为 0. 856 7 ($n = 28$), 达到极显著的水平。

光合生产潜力随时间变化的规律可利用功率谱分析:

表 3 北京地区光合生产潜力功率谱分析

Tab. 3 Aalysis of the power spectrem for the photosynthetic potential in Beijing Area

l	1	2	3	4	5	6	7	
$R(i)$	0. 43	0. 13	0. 17	0. 09	0. 24	0. 20	- 0. 09	
$G(i)$	1. 15	0. 82	3. 38	1. 49	0. 22	0. 25	3. 24	$G_{0.05} = 3. 13$
$K(i)$			9. 3				3. 24	$G_{0.01} = 4. 02$

注: l 为波数; $R(i)$ 为自相关系数; $G(i)$ 为功率谱值; $K(i)$ 为通过 $G_{0.05}$ 或 $G_{0.01}$ 检验的周期。

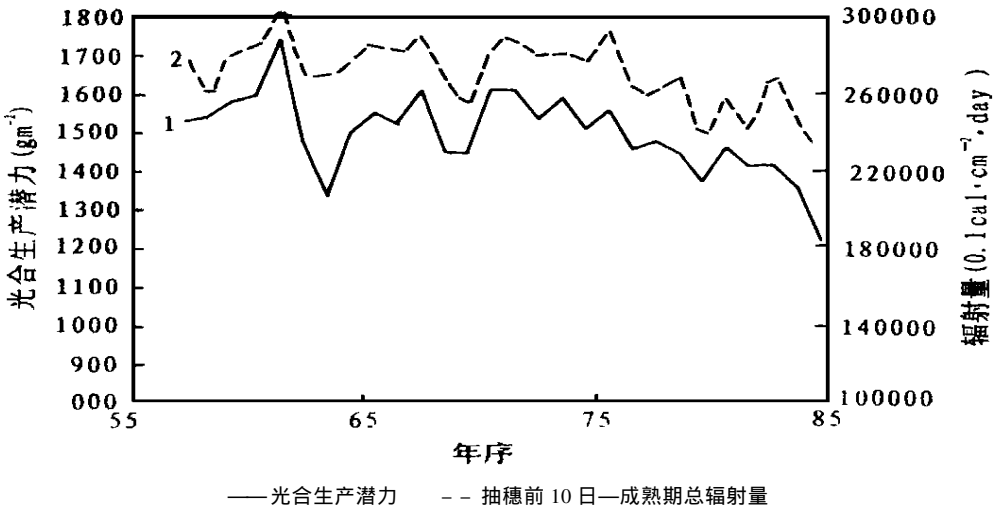


图 1 北京地区历年光合生产潜力及相应抽穗前 10 日—成熟期总辐射量

Fig. 1 Winter Wheat Photosynthetic Potential Each Year and the Corresponding Goble Radiation from 10 Days before Heading to Ripe

可见，北京地区光合生产潜力存在 3 年~ 4 年和 9 年~ 10 年的周期变化。

2. 2 CO₂ 浓度上升对冬小麦光合生产潜力的可能影响

徐群^[18] 对近 29 年太阳总辐射研究结果表明: 太阳总辐射发生了一定变化, 有随 CO₂ 升高而减少的趋势, 但由于 CO₂ 升高对气候变化影响的复杂性, CO₂ 升高后对太阳总辐射的影响尚难完全定论, 所以本文综合考虑了 CO₂ 变化后太阳总辐射的可能变化及 CO₂ 浓度升高后光合作用加强两因子的相互影响, 以 1985 年为例, 将输入的辐射量乘以 (1- q%), q 为辐射降低率, 取值由 - 20 逐步上升至 30 (负值表示辐射增强), 并同时调整叶片光合作用中 λ 、 P_{max} 进行调整, 调整时令其值逐步增加, 由增加 0% 上升至增加 20%, 得到 CO₂ 升高后对冬小麦光合生产潜力可能产生的影响 (图 2)。

图中等值线为光合生产潜力变异系数 $(Y_c - Y_o) / Y_o \times 100\%$, 其中 Y_c 为 CO₂ 上升后的光合生产潜力, Y_o 为 1985 年的冬小麦光合生产潜力; 显然, 尽管 CO₂ 上升引起光合作用增加能够对光合生产潜力产生一定影响, 但起主要作用的是辐射量的变化情况。

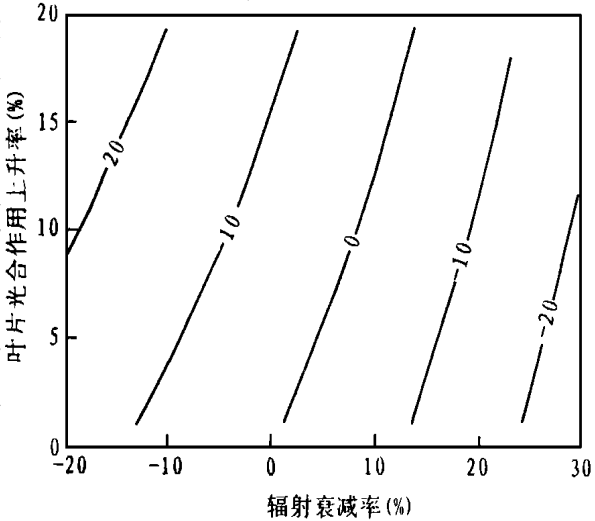


图 2 CO₂ 升高对冬小麦光合生产力的可能影响 (百分比)

Fig. 2 The Possible Influence of the CO₂ Density Increase on Winter Wheat Photosynthetic Potential (%)

2.3 按本文所介绍的方法，首先建立了 1960 年~1985 年北京等地的逐日辐射资料库，利用该数据库输入光合生产潜力模型中，得到黄淮海地区的光合生产潜力分布（图 3）。

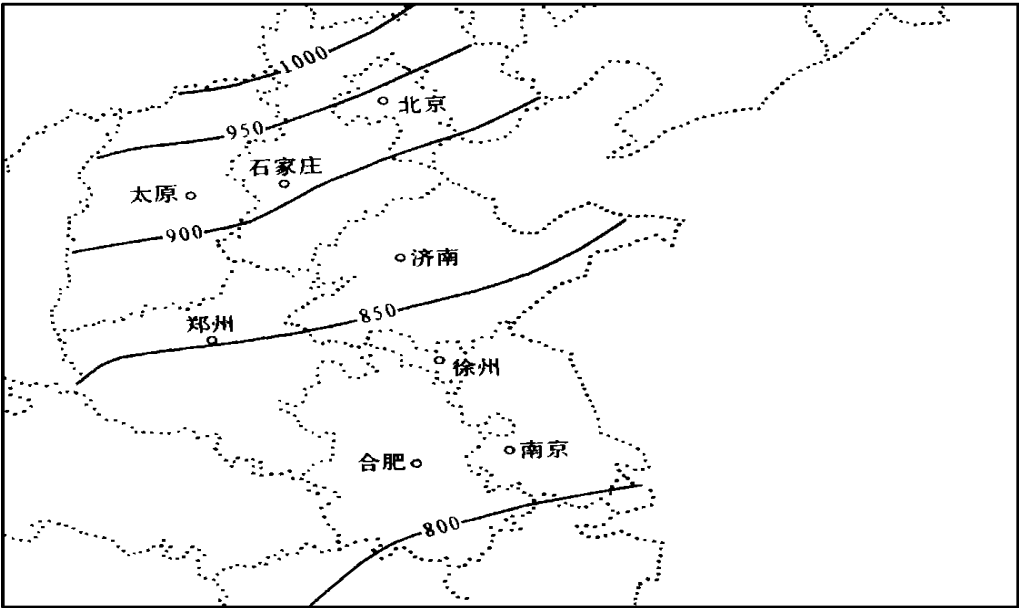


图 3 黄淮海地区光合生产潜力数值模拟结果（等值线单位：kg/亩）

Fig. 3 Results of Numerical Simulation of Winter Wheat Photosyntic Potential in Huanghuaihai Area (Unit of the isopleth: kg/mu)

从图 3 中可以看出，黄淮海地区冬小麦光合生产力值大致由北向南递减，同纬度地区内陆高于沿海，并且递减率由北向南逐渐减小，这与太阳能分布相似；整个黄淮海地区光合生产潜力在 1 000 kg/ 亩 ~800 kg/ 亩之间，石家庄地区为 950 kg/ 亩，这与牛文元^[19]考虑了冬小麦本身生物学特性及叶面积指数进行订正后用统计方法计算的结果940 kg/ 亩非常相近。

需要指出的是本文中所指的冬小麦光合生产力是充分考虑了整个生长过程中冬小麦本身生物学特性基础上计算出的经济产量，模型中考虑了冬小麦的叶丛分布特征。动态模拟过程中叶面积指数并非总处于 5 左右，而是随生长过程而变化，最适温度也没有一直不变，而是动态地随 DVS 而变化，规定其在各发育阶段保持最适，可见本文冬小麦光合生产潜力的定义与以前文献^[1~3]中提出的作物光合生产潜力概念并不完全相同，由于概念不同，所以计算结果偏低，但由模型本身可以看出，模型考虑了冬小麦发育过程中生长特性，如叶丛结构、最适温度变化、叶面积指数变化等，所以做为冬小麦的理论最高产量是比较合适的。

总之，模型模拟结果表明：(1) 光合生产潜力与抽穗前 10 日-成熟期总辐射的相关显著，(2) 北京地区光合生产潜力存在 3 年~4 年和 9 年~10 年的周期变化，(3) 尽管 CO₂ 上升引起光合作用增加能够对光合生产潜力产生一定影响，但起主要作用的是辐射量的变化情况(4) 模拟结果与牛文元^[19]考虑了冬小麦本身生物学特性及叶面积指数进行订正后用统

计方法计算的结果 940 kg/亩非常相近。

3 小结

(1) 数值模拟结果表明:黄淮海地区冬小麦光合生产潜力在 800 kg/亩~1 000 kg/亩之间,与牛文元考虑了冬小麦本身生物学特性及叶面积指数进行订正后用统计方法计算的结果非常相近;冬小麦光合生产力值大致由北向南递减,同纬度地区内陆高于沿海,并且递减率由北向南逐渐减小。

(2) 冬小麦光合生产力年际之间存在变化,功率谱分析表明北京地区光合生产潜力存在 3 年~4 年和 9 年~10 年的周期变化。

(3) 辐射量的变化对冬小麦光合生产力影响很大,当辐射衰减 30% 后,即使叶片光合作用由于 CO₂ 增加而升高 5%^[20],北京地区冬小麦光合生产潜力比目前仍将下降 23% 左右。

(4) 模式运行结果证明光合生产潜力与冬小麦抽穗前 10 天一成熟阶段的总辐射量具有很大的相关性,相关系数为 0.856 7 ($n=28$),相关达到极显著水平。

(5) 本文给出的模式虽然考虑因子比较周全,但任何一个动力模型都只能是系统的一种简化,不可能面面俱到;本模型已经考虑了冬小麦生长发育的主要生物学特性的影响,为合理估计黄淮海地区冬小麦理论最高产量及进一步研究气候资源的数值模拟提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

- 1 黄秉维. 自然条件与作物生产—光合潜力. 中国农业科学院情报所, 1978
- 2 龙斯玉. 我国生理辐射分布及其生产潜力. 气象科技资料, 1976 (4), 农业气象附集
- 3 卢其尧. 我国水稻生产潜力的探讨. 农业气象, 1980 (1)
- 4 杨春虹. 农田小麦光合生产力模拟与分析. 中国科学院北京农业生态系统试验站编. 农田作物环境实验研究. 气象出版社, 1990: 193~203
- 5 董振国. 冬小麦生长率及麦田能量收支分析. 中国科学院北京农业生态系统试验站编. 农业生态环境实验研究. 气象出版社, 1988: 205~211
- 6 De Wit C.T., et al. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, 1978
- 7 范柯伦 H, 沃尔夫 J 主编. 杨守春等译. 农业生产模型—气候、土壤和作物. 中国农业科技出版社, 1990, 221, 65~66
- 8 高国栋. 陆渝蓉著. 中国地表面辐射平衡和热量平衡. 科学出版社, 1983
- 9 左大康等著. 地球表层辐射研究. 北京: 科学出版社, 1991
- 10 沈国权. 作物发育速度的非线性模式和有效积温变量. 气象, 1980, 6(6): 9~11
- 11 中国农业百科全书编委会. 中国农业百科全书. 农业气象卷. 北京: 农业出版社, 1989
- 12 金善宝主编. 中国小麦生态研究. 北京: 科学出版社, 1991
- 13 Penning de Vries et al Eds. Simulation of plant growth and crop production. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen, 1982
- 14 周允华等. 光合有效辐射 PAR 的气候学研究. 气象学报, 1984, 42(4)
- 15 贺兴文等. 我国作物生产潜力的研究方法. 江西农业大学学报, 17(4): 9~16
- 16 项月琴. 周允华等. 冬小麦群丛几何结构的测量. 中国科学院北京农业生态系统实验站. 农业作物环境实验研究. 气象出版社, 1990: 92~103

17 Unger E, Van Keulen H. FORTRAN version of simulation model ARIDCROP. Center for Agrobiological Reseach. Department of Theoretical Production Ecology. Agricultural University. Wageningen. The Netherland, 1982

18 赵宗慈. 对中国气候变化与影响的评估. 丁一汇等编. 环境和气候变化对中国的挑战. 气象出版社, 1993

19 牛文元著. 农业自然条件分析. 北京: 农业出版社, 1981

20 Peart R M, et al. The potential effects of g local climate change on the United State-Report to Congress, U. S. EPA, Washington, 1989, 54

THE NUMERICAL SIMULATION OF THE WINTER WHEAT PHOTOSYNTHETIC POTENTIAL IN THE HUANGHUAIIHAI AREA

Liu Jiandong Fu Baopu Lin Zhenshan Lu Qiyao
(*Department of the Atmospheric Sciences, Nanjing University 210008*)

Abstract

The sub-model for simulating diurnal variation of radiation was given first, then the plant physiological submodel was established, which included development stage, photosynthesis, respiration, partitioning of photosynthesis and consenescence of winter wheat, so a winter wheat photosynthetic potential numerical model was obtained by connecting these submodels. The development rate of winter wheat considered influence of daylength and temperature, and the photosynthesis had considered the influence of leaf inclination of winter wheat.

Using the model to simulate winter wheat photosynthetic potential in the Huanghuaihai Area found that: (1) The potentials are decreased from 15 000 kg/Ha in the north to 12 000 kg/Ha in the south while the decrease rate becomes small. (2) The results of the simulating verified that winter wheat photosynthetic potential is interrelated well with the solar radiation accumulated from 10 days before heading to maturity. (3) Although the density of CO₂ has some influence on winter wheat photosynthetic potential, the main factor which influences winter wheat photosynthetic potential is the volume of radiation. (4) Using the power spectrum to analysize the potential found that the year to year change of the potential in Beijing Area has 3~4 year and 9~10 year cycles.

Key words photosynthetic potential, winter wheat, Huanghuaihai Area, numerical simulation

作者简介

刘建栋, 男, 1969年12月生, 南京大学农业气候学专业博士生, 已在国内外期刊《CTA METEOROLOGICA SINICA》、《自然资源学报》、《南京大学学报》等发表学术论文12篇, 目前与金之庆先生合作利用美国环保署(US EPA)提供的 CERES 系列动力模型及 ARID CROP 模型开发 IPCC (政府间气候变化专门委员会) 国际合作项目“全球气候变化对世界粮食生产的影响评价研究”中国部分的研究。