

# 华北地区冬小麦叶片光合作用模型在农业干旱预测中的应用研究\*

刘建栋<sup>1)</sup> 王馥棠<sup>1)</sup> 于强<sup>2)</sup> 毛飞<sup>1)</sup>  
毕建杰<sup>3)</sup> 樊广华<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (中国气象科学研究院, 北京 100081)

<sup>2)</sup> (中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

<sup>3)</sup> (山东农业大学农学系, 泰安 271018)

## 摘要

在冬小麦抽穗—灌浆期进行了水分胁迫实验,利用美国 Licor 公司生产的 Licor 188B 辐射量子照度仪及 Licor 6400 便携式光合作用测定仪,对水分胁迫引起的冬小麦光合生理生态变化进行了系统观测,系统地给出了冬小麦多种农业气象指标对水分胁迫的响应状况。在大量实测数据基础上,给出了包含辐射强度、温度及土壤水分因子的冬小麦叶片光合作用模式。该模式具有严格的理论推导过程和大量实验数据的支持,改进了传统水分胁迫对叶片光合速率影响的简单阶乘方法,从而为进一步准确推算水分胁迫对大田冬小麦光合作用的可能影响,以及水分胁迫对区域农业干旱的可能影响奠定了前提条件。该研究是冬小麦干旱预测模型的叶子模型,为冬小麦农业干旱预测模型提供了丰富的基本参数,同时也为建立冬小麦干旱预测模型奠定了基本条件。

关键词: 华北地区 冬小麦 农业干旱模型

## 引言

华北地区是中国粮食主产区之一,近年来该地区干旱发生较为频繁,给农业生产带来较大损失,各级政府部门迫切需要及时准确的农业干旱预报信息。建立起具有一定准确度的农业干旱预测模式,大幅度提高农业干旱预警预报能力显得十分必要<sup>[1,2]</sup>。

对华北大部分地区而言,农业干旱主要是指田间水分不能满足作物生长的需水量,从而导致水分对作物生长产生一定胁迫。水分对作物生理生态及产量形成影响很大<sup>[3-5]</sup>,朱自玺等就水分胁迫对冬小麦、夏玉米产量及生理影响进行了大量的实验测定,并进行了相应的水分动态分析和预报研究<sup>[6-8]</sup>;安顺清系统地研究了华北地区气象旱度模式,并对干旱特征进行了深入分析,提出了优化灌溉的理论依据<sup>[1,9]</sup>;王馥棠、王石立等建立了水分及氮素胁迫下的小麦生长模式,并进行了小麦干旱影响评价<sup>[10-11]</sup>;韩湘玲、吴连海

\* 国家“十五”科技攻关计划“农林重大病虫害和农业气象灾害的预警及控制技术研究”之“农业气象灾害预警技术研究”(2001BA509B13)及科技部社会公益研究专项资助项目“华北干旱和东北低温冷害监测预警技术研究”(2001DIB20096)课题资助。

2003-04-06 收到,2003-06-05 收到修改稿。

等运用数值方法探讨了水分因子对冬小麦生产力的影响<sup>[12]</sup>,以上研究为农业干旱预测模型提供了有力的理论基础。

叶片光合过程是作物模型中最为重要的关键子模型,建立农业干旱预测模式的基本前提条件是首先确定叶片光合作用模型。受到当时仪器条件限制,以往模式中的叶片子模型往往缺乏实测数据的支持,并且叶片模型往往采用阶乘方法,缺乏严格推导过程。本文拟在前人研究基础上,首先就水分胁迫对冬小麦农业气象指标的影响进行系统的全面实验研究,并且在大量实测数据基础上对叶片光合作用模式进行较为严格的推导,以期建立起包含多因子的叶片光合作用模式,为进一步建立华北地区农业干旱预测模型提供前提条件。

## 1 实验场地及研究方法

实验在山东农业大学试验农场进行,2001年10月1日播种,品种是目前华北地区主要品种鲁麦23号,水、肥、管理均非常适宜,幼苗长势整齐良好。2002年2月29日进行盆栽实验,采用大口径培养盆,布置11个水分处理,每个处理3个重复。2002年4月10日冬小麦进入拔节后期,开始进行水分调控,11个水分处理序列号分别为0,1,2,……,10。其中,序列号为0的水分处理为完全不浇水,序列号为10的水分处理为加入达到土壤持水量C的水分,序列号为1的水分处理为加入达到土壤持水量10%的水分,其它依次类推,使其产生大致相等的水分梯度。2002年4月25日至27日在典型晴天利用仪器进行了多项指标测定。

测定项目包括:(1)利用电烘箱及日本SP510D电子自动称重天平(精确度0.001g)采用烘干法测定不同水分处理的土壤湿度(土壤湿度=水重/干土重);(2)目测当时各种水分处理的植株外部形态:为消除主观影响,3人共同目测记录,结果基本一致;(3)利用钢尺测定各种水分处理的株高:对各重复分别测定,然后取平均值;(4)利用烘干法测定叶片含水量;(5)叶片厚度指标:取各种水分处理下的冬小麦叶片,利用标准坐标纸测定其叶面积,并用电子天平测定其干重,厚度指标采用比叶重。比叶重=干重/叶面积,即一定叶面积对应的干重,某种程度上讲比叶重越大则叶片厚度越大;(6)利用美国Licor公司生产的Licor-188B辐射量子照度仪测定不同水分处理的叶片上方总辐射、反射辐射和下方透射辐射;(7)利用美国Licor公司生产的Licor-6400便携式光合作用测定仪测定不同水分处理叶片的光合生理等指标,Licor-6400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,Licor-6400探头可按要求调节所测定叶片上方的辐射强度,从而测定出光强渐变时冬小麦叶片光合速率对光强的响应过程。

## 2 水分胁迫对冬小麦生理生态的影响

### 2.1 水分胁迫对叶片表现特征的影响

叶片的表现形态是作物对水分胁迫生理反应的外部表现(表1),当土壤湿度低于

0.12,即低于田间持水量的52.2%,叶片边际开始焉萎。当土壤湿度下降至0.10,即田间持水量的43.5%时,半数叶片开始焉萎,所以从表观形态而言,可以将田间持水量的43.5%~52.2%做为叶片缺水的形态指标。当土壤湿度在0.18~0.20时,叶片深绿,生长状况良好,底部黄叶少。因此,将田间持水量的78.3%~86.9%做为叶片表观形态的水分最适指标。

表1 不同土壤湿度冬小麦叶片表观特征

处理号	土壤湿度	叶片表观特征
0	0.04	已近死亡,底部黄叶非常多,叶片打卷。
1	0.05	浅绿,底部黄叶非常多,叶片均发焉,叶片尖全部为黄尖。
2	0.06	浅绿,底部黄叶很多,多数叶片发焉,多数叶片尖部为黄叶。
3	0.08	浅绿,底部黄叶很多,多数叶片开始发焉,多数叶片尖部为黄叶。
4	0.10	浅绿,底部黄叶很多,半数叶片开始发焉,半数叶片尖部发黄。
5	0.12	绿,生长状况略差,底部黄叶多,个别叶片开始发焉。
6	0.14	深绿,底部黄叶较多,个别叶片尖部显黄。
7	0.16	深绿,生长状况较好,底部黄叶略有增加。
8	0.18	深绿,生长状况良好,底部黄叶少。
9	0.20	深绿,生长状况良好,底部黄叶少。
10	0.23	深绿,稍显倒伏,底部黄叶少。

## 2.2 水分胁迫对冬小麦株高及叶片厚度的影响

植株高度与土壤湿度的关系见图1(a),冬小麦株高随湿度增加而增大,当土壤湿度为田间持水量的86.9%时达到最大值,其后随土壤湿度的进一步增加,株高减小。每个处理的多次重复均证实了这一点,所以从一定角度讲,干旱影响光合生产并使根系优先生产,会很大程度地降低株高。

直接测定冬小麦叶片厚度较为困难,原因是当卡尺测量时,为保证测量结果的准确性,需要对测量体施加一定的压力,然而随着压力加大,卡尺甚至会穿进叶片内部造成测量失败。据此,研究中采用比叶重作为叶片厚度指标,目前无法严格证明比叶重与叶片厚度之间存在绝对的一一对应的正相关,但一定叶面积下干物重越大,叶片越厚,这应当是可以令人接受的。图1(b)表明:在干旱情况下,比叶重随土壤湿度的增加而增大,到田间持水量的86.9%时达到最大值,随着湿度的进一步增加,比叶重略为变小。

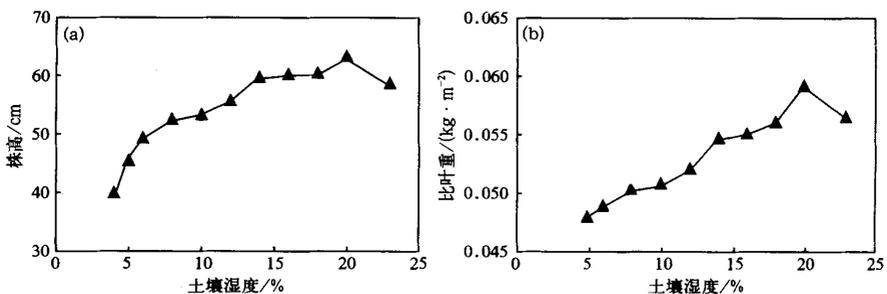


图1 不同水分处理对冬小麦株高及叶片厚度的影响  
(a)水分胁迫对株高的影响,(b)水分胁迫对比叶重的影响  
(鲁麦23号,泰安,2002-04-27中午,典型晴天)

### 2.3 水分胁迫对冬小麦叶片含水量及叶片光学特性的影响

叶片含水量  $L_S = (L_S - L_G) / L_S$ ,  $L_S$  为叶片鲜重,  $L_G$  为叶片干重。已有研究表明<sup>[13]</sup>,作物光合能力随着叶片含水量的增加而增强,当含水量过大时,光合能力开始下降。而表 1 已经表明作物表观形态与土壤湿度之间也呈现出完全一致的变化趋势,所以可以推断叶片含水量与土壤水分之间应当保持一种正相关关系。从图 2(a)可以看出:叶片含水量随土壤湿度增加而增大,一直到田间持水量,两者之间确实呈典型的正相关。在不受其他因子如肥料、管理措施胁迫时,土壤湿度与叶片含水量之间存在着较好的正相关。由于叶片含水量难以获取,而土壤湿度可以作为中间变量在运行模型时计算得到,因此这为以后建立农业干旱模式,在水分因子订正项中采用土壤湿度而不再采用叶片含水率的作法提供了依据。

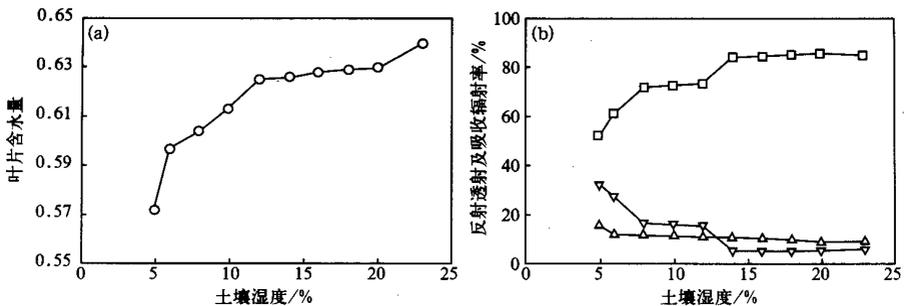


图 2 水分胁迫对冬小麦叶片含水量及叶片光学特性的影响

(a) 土壤湿度对叶片含水量的影响, (b) 土壤湿度对叶片光学特性的影响

(鲁麦 23, 泰安, 2002-04-27 中午, 典型晴天)

(○为叶片含水量, △为反射辐射率, ▽为透射辐射率, □为吸收辐射率)

土壤湿度与叶片含水量呈正相关,土壤湿度越大,叶片含水量越大,必然使叶片反射率变小,实际测定结果反映了这种变化规律。利用 Licor-188B 辐射量子照度仪,采用其 SB-200 光合有效辐射光量子通量密度探头,将叶片水平放置,测定了不同水分处理状况下的叶片上方总辐射  $Q$ 、反射辐射  $R$  以及叶片下方的透射辐射  $T$ ,计算了叶片反射辐射率  $\rho = R/Q$ 、透射辐射率  $\tau = T/Q$ ,以及吸收辐射率  $\gamma = 1 - \rho - \tau$ 。图 2(b)表明:总体而言透射辐射率随反射辐射率同步变化,这与 Ross<sup>[14]</sup>透射与反射光谱相似的观点是一致的。吸收辐射率在土壤湿度达到田间持水量 60.8% 后保持较高值,这是因为土壤湿度影响了叶片水分含量和厚度,进而综合影响到叶片的光学特性。

Ross<sup>[14]</sup>认为透射与反射光谱是相似的,在光合有效辐射部分反射通常超过透射,并且吸收辐射率可以达到 0.85 左右,这一观点及系数一直在数值模拟研究中广为应用。但对华北地区包括夏玉米、冬小麦、大豆在内的多种作物进行多次重复测定分析,在光合有效辐射部分,反射辐射率并不一定比透射辐射率高,吸收辐射率也不一定为 0.85,不同的作物,有一定的变化幅度,所以 Ross 理想状况下的“平均”绿色叶片吸收辐射率不能代表所有作物,对不同作物要进行实际测定。

### 3 水分胁迫对冬小麦叶片光合作用的影响

#### 3.1 水分胁迫对最大光合速率和初始光合效率的影响

当肥力及管理措施适宜时,叶片光合作用可以表示为

$$P_z = f(C, I, T, w) \quad (1)$$

式中  $P_z$  为叶片总光合作用速率;  $C$  为  $\text{CO}_2$  浓度;  $I$  为光合有效辐射强度;  $T$  为温度, 为方便模式应用, 一般采用气温值;  $w$  为土壤湿度。以往作物生长数值模式中, 进行水分因子订正时, 是在高光强下测定叶片光合作用强度与土壤湿度之间的关系, 然后采用阶乘方法, 建立叶片光合作用模式

$$P_z = P(C, I) \cdot f(T) \cdot \psi(w) \quad (2)$$

式中  $P(C, I)$  为一定  $\text{CO}_2$  浓度及光合有效辐射强度下的光合作用速率,  $f(T)$  是温度订正函数,  $\psi(w)$  是水分影响函数。这种水分订正方法实际上是默认土壤湿度仅影响作物的最大光合速率  $P_{\max}$ , 迄今为止这种阶乘方法应用如此广泛, 几乎成为一种既定的公理<sup>[15,16]</sup>。但是应当指出这种水分订正方法从未进行过严格的理论推导, 因此, 需要建立起基于实验之上的具有一定推导过程的叶片模式。叶片净光合速率  $P_n$  为

$$P_n = P_z - R_d \quad (3)$$

式中  $R_d$  为暗呼吸速率。当土壤湿度固定为某一湿度  $w_0$  时, 总光合速率可以表示为<sup>[17,18]</sup>

$$P_z = \frac{\alpha I P_{\max}}{\alpha I + P_{\max}} \cdot f(T) \quad (4)$$

$$f(T) = \frac{2(T+B)^2(T_{\max}+B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} \quad (5)$$

式中  $\alpha$  为初始光合作用效率;  $I$  为光合有效辐射;  $P_{\max}$  为最大光合速率;  $f(T)$  为温度影响订正函数, 其中  $T$  为气温,  $T_{\max}$  为叶片光合的最适温度,  $B$  为常数。生理实验表明: 冬小麦光合作用随温度升高显著增强,  $25\text{ }^\circ\text{C}$  达到最大值, 超过  $25\text{ }^\circ\text{C}$  逐渐减弱, 所以  $f(T)$  函数中  $T_{\max} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $B = 10$ 。暗呼吸  $R_d$  可以分解为维持呼吸  $R_w$  和生长呼吸  $R_s$

$$R_d = R_w + R_s \quad (6)$$

其中维持呼吸  $R_w$  和生长呼吸  $R_s$  可分别表示为

$$\begin{cases} R_w = r_w \cdot D_M \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}} \\ R_s = (1 - C_{VF}) \cdot (P_z - R_w) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $r_w$  为维持呼吸系数;  $D_M$  为干物重;  $Q_{10} = 2$ , 为温度每增加  $10\text{ }^\circ\text{C}$  呼吸速率增加的倍数;  $T_m$  为参考温度, 一般取  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $C_{VF}$  为初始光合产物的转化效率。  $R_w$  和  $C_{VF}$  为生物化学参数, 由测定时的暗呼吸资料确定其取值分别为:  $r_w = 50.245\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $C_{VF} = 0.75$ 。

根据实测资料, 利用迭代法进行数值模拟, 得到不同土壤湿度状况下的光-光合作用曲线(图 3), 不同土壤湿度状况下光合作用响应曲线明显不同, 初始光合效率  $\alpha$  及最大光

合速率  $P_{\max}$  均发生改变 :

当  $w = 4\%$  时,  $\alpha = 0.0445, P_{\max} = 6.6057$

当  $w = 14\%$  时,  $\alpha = 0.0761, P_{\max} = 23.3962$

当  $w = 18\%$  时,  $\alpha = 0.0764, P_{\max} = 28.3006$

当  $w = 23\%$  时,  $\alpha = 0.0751, P_{\max} = 26.2629$

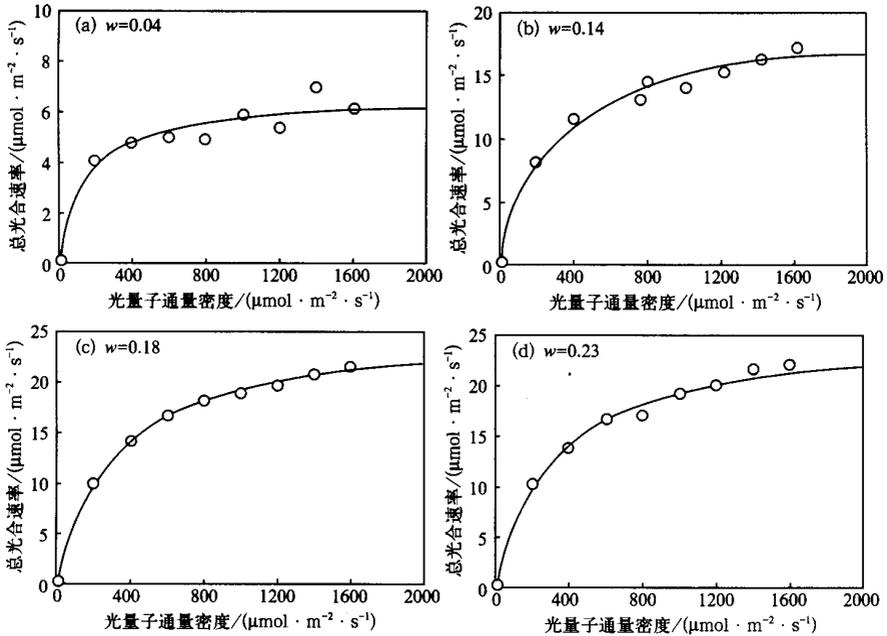


图 3 不同土壤湿度条件下的光-光合作用曲线

(鲁麦 23, 泰安, 2002-04-27 中午, 典型晴天)

用以上方法对所有水分处理状况下的光合作用曲线进行数值拟合, 得到初始光合效率  $\alpha$  及最大光合速率  $P_{\max}$  随土壤湿度变化过程 (图 4)。叶片初始光合效率  $\alpha$  和最大光合速率  $P_{\max}$  与土壤湿度  $w$  的关系可拟合为

$$\begin{cases} \alpha(w) = \alpha_0 \times \bar{\alpha}(w) = \alpha_0 \times (\alpha w^2 + b w + c) \\ P_{\max}(w) = P_{\max 0} \times \overline{P_{\max}}(w) = P_{\max 0} \times (a' w^2 + b' w + c') \end{cases} \quad (8)$$

式中  $\alpha_0$  为初始光合效率的最大值;  $P_{\max 0}$  为最大光合速率的最大值;  $\bar{\alpha}(w)$ 、 $\overline{P_{\max}}(w)$  为归一化函数。

图 4 表明: 土壤湿度不但影响最大光合速率, 而且影响了初始光合效率, 并且对两者的影响并不是同步的。最大光合速率参数随着土壤湿度的增加而增大, 到田间持水量的 86.9% 左右时达到最大值, 以后逐渐变小。而初始光合效率却在一定程度的水分胁迫情况下出现最大值。实验的每一次处理均有多次重复, 仪器测前经过严格标定, 所以可以推断在干旱情况下, 冬小麦具有一定的自身调节机制, 提高初始光合效率, 部分弥补水分胁迫带来的负作用。这和植物生理学研究结果基本是一致的<sup>[19]</sup>: 作物生长受到一定的有限

水分胁迫时, 光合作用的气孔限制因子和非气孔限制因子变得非常复杂, 气孔具有一定的自动调节, 尽可能使光合作用达到较高值。

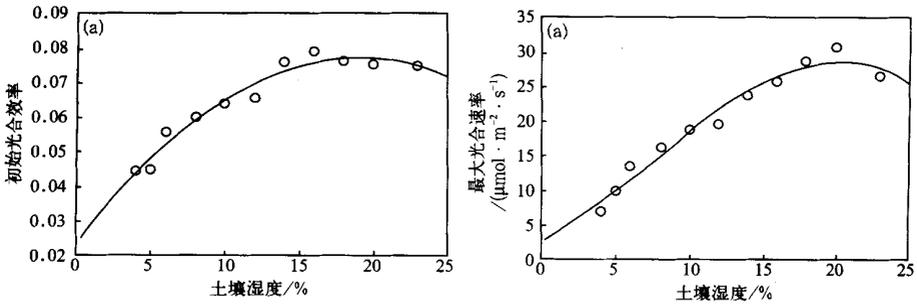


图 4 土壤湿度对叶片初始光合效率  $\alpha$  及最大光合速率  $P_{\max}$  的影响

(a) 土壤湿度对初始光合效率的影响 ( $\alpha(w) = 0.077 \times (0.304 + 0.0739 w - 0.00195 w^2)$  ,

$R = 0.95888$  ,  $N = 11$  ,  $P < 0.0001$ ) , (b) 土壤湿度对最大光合速率  $P_{\max}$  的影响

( $P_{\max}(w) = 28.4 \times (0.0757 + 0.0434 w + 0.00244 w^2 - 0.000115 w^3)$  ,  $R = 0.97162$  ,  $N = 11$  ,  $P < 0.0001$ )

### 3.2 叶片光合作用模式验证及讨论

综上所述, 代入实测数据利用非线性迭代法求解, 得到黄淮海地区冬小麦叶片模式

$$\begin{aligned}
 P_n &= \frac{\alpha(w) I P_{\max}(w)}{\alpha(w) I + P_{\max}(w)} \cdot \frac{2(T+B)^2 (T_{\max}+B)^2 - (T+B)^4}{(T_{\max}+B)^4} - R_d \\
 R_d &= R_w + R_s \\
 R_w &= r_w \cdot D_M \cdot Q_{10}^{\frac{T-T_m}{10}} \\
 R_s &= (1 - C_{VF}) \cdot (P_z - R_w) \\
 \alpha(w) &= 0.077 \times (0.304 + 0.739 \times 10^{-1} w - 0.195 \times 10^{-2} w^2) \\
 P_{\max}(w) &= 28.4 \times (0.757 \times 10^{-1} + 0.434 \times 10^{-1} w + 0.244 \times 10^{-2} w^2 - \\
 &\quad 0.115 \times 10^{-3} w^3)
 \end{aligned} \tag{9}$$

模式中, 对  $\alpha(w)$  和  $P_{\max}(w)$  的拟合是二次或三次函数统计模式, 模拟结果见图 4, 复相关系数分别为 0.96 和 0.97, 均通过显著性检验。应当指出: 所有经验统计模式的最根本原理是大数定律, 通过最小二乘法建立最优统计模式, 所以必然带有一定的局限性。图中当湿度接近 0 时, 订正函数并不为 0, 因此是不合理的。如果建立的多次函数式中不包括常数项, 会避免这一不合理现象, 但拟合效果相对较差, 所以仍以采用常数项的多次函数为佳。模式应用时如果土壤湿度  $w$  接近于 0, 则令  $P_{\max} = 0$ 。

如上所述, 实验中分为 11 个水分处理, 每个水分处理测定了光渐变过程的 9 组光合作用数据 (图 3)。利用该叶片模式对不同水分状况下以及不同辐射强度下的 99 组叶片光合作用速率进行模拟结果见图 5(a)。在样本数  $N = 99$  的情况下, 相关系数  $R$  可达到 0.98, 而传统阶乘模式对实测结果模式的相关系数  $R = 0.79$ , 所以该叶片模式比传统阶乘模式具有更高的准确度。

对该叶片模式进行数值分析, 当不考虑温度影响, 即  $f(T) = 1$  的情况下, 叶片总光合

速率为

$$P_z = \frac{\alpha(w) IP_{\max}(w)}{\alpha(w) I + P_{\max}(w)} = \frac{a_0 \alpha(w) IP_{\max0} \overline{P_{\max}(w)}}{a_0 \alpha(w) I + P_{\max0} \overline{P_{\max}(w)}} \quad (10)$$

而传统阶乘模式,是仅依据高光强下土壤湿度对光合速率影响建立订正函数,叶片总光合速率表示为

$$P'_z = \frac{a_0 IP_{\max0}}{a_0 I + P_{\max0}} \cdot \overline{P_{\max}(w)} \quad (11)$$

对式(10)整理得到一定辐射强度  $I$  时的叶片模式  $P_z$

$$P_z = \frac{a_0 IP_{\max0}}{a_0 I + \frac{P_{\max0} \overline{P_{\max}(w)}}{\alpha(w)}} \cdot \overline{P_{\max}(w)} \quad (12)$$

因此,与传统阶乘模式(11)相比,本文建立的叶片模式多了一个订正项。

将  $I$  每隔  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  取值一次,取得不同  $I_0$  状况下  $P_z$  随  $w$  的变化曲线如图 5(b)。数值分析表明:不同辐射强度下,土壤湿度对光合作用的影响不同。当  $I \rightarrow \infty$ ,由式(12)可以得出  $P_z = P_{\max}(w)$ 。即辐射很强时,光合速率仅受最大光合速率的影响,此时只需测定最大光合速率值与土壤湿度间的关系即可。所以在高光强下,本文建立的叶片模式与传统阶乘方法是一致的。换言之,传统阶乘方法是该叶片模式的一种特例。当  $I \rightarrow 0$ ,即辐射强度非常小时: $P_z = 0$ 。即辐射很弱时,辐射本身演变为最低限制因子。当保持在某一特定辐射强度  $I$  时,光合速率受到初始光合速率  $\alpha(w)$  及最大光合速率参数  $P_{\max}(w)$  的综合影响,这也从一个角度反过来说明了建立叶片模式的必要性。

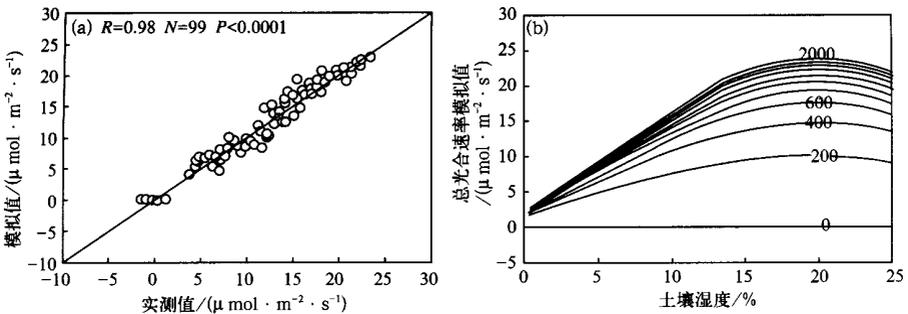


图 5 叶片模式的验证及数值分析

- (a) 叶片净光合速率模拟值与实测值的比较,  
 (b) 不同辐射强度下总光合速率随土壤湿度的变化

## 4 结论与讨论

(1) 对华北地区鲁麦 23 号冬小麦拔节—抽穗期进行了水分胁迫实验,对光合生理生态进行了大量测定,研究表明:可以将田间持水量的  $43.5\% \sim 52.2\%$  做为叶片缺水的形态指标,将田间持水量的  $78.3\% \sim 86.9\%$  做为叶片表现形态的水分最适指标。在干旱的

情况下,比叶重随土壤湿度的增加而增大,到田间持水量的 86.9% 时达到最大值,随着湿度的进一步增加,比叶重略为变小。叶片含水量与土壤湿度大致成正相关,吸收辐射率则受叶片湿度与叶厚的综合影响,当土壤湿度达到持水量 60.8% 后叶片吸收辐射率保持较高值。

(2) 大量实验资料基础上的数值模拟结果表明:土壤湿度同时影响了叶片初始光合速率和最大光合速率参数,在实验基础上,推导出了华北地区冬小麦叶片光合作用模式,比传统方法更为准确。文中给出的华北地区冬小麦大量生理生态实测参数,以及叶片模式,为进一步建立华北地区冬小麦农业干旱模式提供了可靠的基本模型参数。

(3) 由于本研究旨在建立冬小麦农业干旱模式,所以本文主要研究了冬小麦水分关键期的主要农业气象模式参数。在条件允许的情况下,在未来研究中逐步测定其它时期的关键参数,并在此基础上建立农业干旱模式,应当是必要的。

## 参 考 文 献

- 1 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组编著. 作物水分胁迫与干旱研究. 郑州:河南科学技术出版社,1990. 1~235.
- 2 毛学森,王新元. 华北低平原小麦—玉米周年耗水规律研究. 见:刘昌明主编. 中国水问题研究. 北京:气象出版社,1996. 149~153.
- 3 冯秀藻主编. 农业气象原理. 北京:气象出版社,1991. 153~211.
- 4 Teare I D, Peet M M. Crop Water Relations. A WIP, New York, 1983. 73~126.
- 5 Gajri P R, Prihar S S, Arora V K. Effects of nitrogen and early irrigation on root development and water use for wheat on two soils. *Field Crop Research*, 1989, 21(1): 103~114.
- 6 朱自玺,牛现增,侯建新. 冬小麦水分动态分析及干旱预报. *气象学报*, 1988, 46(2): 202~209.
- 7 朱自玺,侯建新. 夏玉米土壤水分指标研究. *气象*, 1988, 14(9): 13~16.
- 8 朱自玺. 夏玉米耗水量和耗水规律分析. *华北农学报*, 1987, 2(3): 52~60.
- 9 安顺清,邢久星. 帕默尔气象旱度模式的修正. *气象科学研究院院刊*, 1986, 1(1): 75~82.
- 10 陈振林,王馥棠. 水分和氮素营养胁迫下春小麦生长模拟模式的研究. *应用气象学报*, 1995, 6(3): 475~485.
- 11 王石立. 冬小麦生长模式及其在干旱影响评估中的应用. *应用气象学报*, 1998, 9(1): 15~23.
- 12 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.
- 13 汪永钦. 冬小麦生长和产量形成与气象条件关系及其动态模拟的研究. *气象学报*, 1991, 49(2): 205~214.
- 14 蒙特思 J L 主编. 植被与大气—原理. 卢其尧,江广恒,高亮之译. 北京:农业出版社,1985. 23~27.
- 15 Van Keulen H, Seligman N G, Benjiami R W. Simulation of water use and herbage growth in arid regions—a reevaluation and further development of the model “ARID CROP”. *Agric Syst.*, 1981, 6(3): 159~196.
- 16 Penning de Vries F W T. Simulation of Plant Growth and Crop Production. PUDOC, Wageningen, 1982. 20~160.
- 17 索恩利. 植物生理的数学模型. 王天铎等译. 北京:科学出版社. 1983. 110~112.
- 18 韩湘玲主编. 作物生态学. 北京:气象出版社,1991. 42~47.
- 19 邹琦主编. 作物抗旱生理生态研究. 济南:山东科学技术出版社,1994. 155~283.

## APPLICATION OF THE LEAF PHOTOSYNTHESIS MODEL FOR FORECASTING EFFECT OF DROUGHT ON WINTER WHEAT IN NORTH CHINA PLAIN

Liu Jiandong<sup>1)</sup> Wang Futang<sup>1)</sup> Yu Qiang<sup>2)</sup> Mao Fei<sup>1)</sup> Bi Jianjie<sup>3)</sup> Fan Guanghua<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ( Chinese Academy of Meteorological Sciences , Beijing 100081 )

<sup>2)</sup> ( Institute of the Geographic Sciences and Resources Research , CAS , Beijing 100101 )

<sup>3)</sup> ( Department of Agronomy , Shandong Agricultural University , Taian 271018 )

### Abstract

The North China Plain is one of the most important food crop production regions in China, and the winter wheat is frequently influenced by droughts during its growth periods. In order to give the accurate drought information, a water stress experiment was made during the jointing stage of winter wheat in the Shandong Agricultural University. The photosynthesis change due to water stress was measured systematically, and a number of agrometeorological indexes responding to the water stress were determined. A combined model is established for simulating leaf photosynthesis based on the data observed with Licor-6400, which includes environmental factors such as CO<sub>2</sub> concentration, solar radiation, temperature and soil humidity. Validation of the model shows that it can simulate photosynthetic rate fairly well, and the coefficient of correlation can reach 0.98 with 99 samples. A great deal of observed data is given, which provides basic parameters for establishing the agrometeorological model so to forecast the effect of drought on winter wheat in North China Plain.

**Key words:** Agrometeorological model Winter wheat Drought stress