

## 一、环境监测指标（光、温、水、肥、气等）

### 1. 光照相关

#### ○ 光合有效辐射（PAR）：

- 基于辐射传输模型，简化版可表示为  $PAR = PAR_0 \times e^{-k \times LAI}$ 。其中， $PAR_0$  为冠层上方光合有效辐射（可通过气象站辐射观测或卫星遥感反演，如用天文辐射公式结合大气透射率计算：

$PAR_0 = I_{sc} \times \frac{r^2}{d^2} \times \tau \times \cos \theta$ ， $I_{sc}$  为太阳常数， $r$  为日地距离， $d$  为平均日地距离， $\tau$  为大气透射率， $\theta$  为太阳天顶角）； $k$  为消光系数（与作物群体结构、叶倾角等有关，叶水平排列作物  $k$  约 0.5 - 0.6，叶直立排列  $k$  约 0.3 - 0.4）； $LAI$  为叶面积指数。

- 用光谱仪测量时，根据不同波段响应函数， $PAR = \sum_i R_i \times f_i$ ， $R_i$  为第  $i$  波段辐射值， $f_i$  为该波段对光合有效辐射的贡献系数。
- 光子通量密度（PPFD）：单位时间单位面积上的光子数，与光合有效辐射换算关系（近似）： $PPFD \approx 4.6 \times PAR$ （ $PAR$  单位  $\mu mol/(m^2 \cdot s)$ ， $PPFD$  单位同，系数因光质等有波动，晴天太阳光谱下该换算常用）。

### 2. 温度相关

#### ○ 积温（ $T_a$ ）：

- 活动积温： $T_{a-active} = \sum_{i=1}^n T_i$ （ $T_i \geq T_b$ ， $T_b$  为生物学下限温度， $n$  为天数），如水稻  $T_b$  约  $10^\circ C$ ，统计生育期内日平均温度  $\geq 10^\circ C$  的温度累加值。
- 有效积温： $T_{a-effective} = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$ （ $T_i \geq T_b$ ），更精准反映对作物发育的热量贡献。

#### ○ 温度胁迫指标（如高温热害、低温冷害）：

- 高温胁迫度（以水稻开花期为例）： $HSI = \frac{\sum_{i=1}^m (T_i - T_c)}{m}$ （ $T_i > T_c$ ， $T_c$  为临界高温，水稻开花期  $T_c$  约  $35^\circ C$ ， $m$  为高温持续天数），衡量高温对结实率等的影响程度。
- 低温冷害（如水稻苗期）： $CSI = \sum_{i=1}^k (T_b - T_i)$ （ $T_i < T_b$ ， $k$  为低温持续天数），反映低温对生长发育抑制。

### 3. 水分相关

#### ○ 土壤水分特征：

- 土壤含水率（质量含水率  $\theta_m$ ）： $\theta_m = \frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \times 100\%$ （ $m_{wet}$  为湿土质量， $m_{dry}$  为烘干后土质量）；体积含水率  $\theta_v = \theta_m \times \rho_b / \rho_w$ （ $\rho_b$  为土壤容重， $\rho_w$  为水的密度）。
- 田间持水量（ $FC$ ）：通过压力膜仪等测定，理论上是土壤毛管悬着水达最大时的含水率，也可经验公式估算（不同土壤质地有差异，如砂土  $FC \approx 10\% - 20\%$  体积含水率，黏土  $FC \approx 30\% - 40\%$ ）。
- 凋萎系数（ $PWP$ ）： $\theta_{PWP} = \frac{\psi_{PWP}}{\psi_m}$ （ $\psi_{PWP}$  为凋萎时土壤水势，约 -1.5MPa， $\psi_m$  为土壤基质势与含水率关系，通过水分特征曲线确定，如 van Genuchten 模型  $\psi(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{(\theta_r)^{\frac{1}{n}} - \theta^{\frac{1}{n}}}{1 - (\theta_r)^{\frac{1}{n}}} \right)^{-m}$ ， $\alpha, n, m$  为土壤参数， $\theta_r$  为残余含水率）。

○ 作物需水量 ( $ET_c$ ) :

- 基于 Penman - Monteith 公式计算参考作物蒸散量  $ET_0$  , 再乘以作物系数  $K_c$  , 即

$$ET_c = K_c \times ET_0 . ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (\text{符号含义同前}) ; K_c \text{ 随作物生育阶段}$$

变化, 如水稻生育期  $K_c$  插秧 - 返青约 0.8 - 1.0, 分蘖 - 抽穗约 1.1 - 1.2, 灌浆 - 成熟约 0.9 - 1.0 。

○ 水分胁迫指数 (如作物水分胁迫指数  $CWSI$ ) :

- $CWSI = \frac{T_c - T_a}{T_{c,max} - T_a}$  ( $T_c$  为作物冠层温度,  $T_a$  为空气温度,  $T_{c,max}$  为充分供水时冠层温度, 通过试验或模型确定), 反映作物受水分胁迫程度, 值越接近 1 胁迫越重。

#### 4. 肥料 (养分) 相关

○ 土壤养分含量 (以氮素为例) :

- 全氮: 凯氏定氮法测得,  $N_{total} = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 0.014 \times 1000}{m}$  ( $V_1$  为滴定样品消耗酸体积,  $V_2$  为空白消耗酸体积,  $c$  为酸浓度,  $m$  为土样质量, 0.014 为氮摩尔质量) 。
- 速效氮 (如碱解氮) : 碱解氮 =  $\frac{(V - V_0) \times c \times 0.014}{m} \times 1000$  ( $V$  为样品滴定用酸体积,  $V_0$  为空白, 其余符号同全氮) 。

○ 养分平衡 (氮素平衡为例) :

- 土壤氮素平衡:  $N_{balance} = N_{input} - N_{output}$  。

$N_{input} = N_{fertilizer} + N_{organic} + N_{deposition} + N_{irrigation}$  ( $N_{fertilizer}$  为化肥施氮量,  $N_{organic}$  为有机肥输入氮,  $N_{deposition}$  为大气沉降氮,  $N_{irrigation}$  为灌溉水带入氮) ;

$N_{output} = N_{cropuptake} + N_{leaching} + N_{volatilization} + N_{denitrification}$  ( $N_{cropuptake}$  为作物吸收氮,  $N_{leaching}$  为淋失氮,  $N_{volatilization}$  为氨挥发氮,  $N_{denitrification}$  为反硝化损失氮) 。

#### 5. 气体 ( $CO_2$ 、 $O_3$ 等) 相关

○  $CO_2$  浓度与光合响应:

- 光合速率对  $CO_2$  响应 (直角双曲线模型) :  $P_n = \frac{P_{max}(C_i - C_0)}{K_m + (C_i - C_0)}$  ( $P_{max}$  为最大光合速率,  $C_i$  为胞间  $CO_2$  浓度,  $C_0$  为  $CO_2$  补偿点,  $K_m$  为米氏常数) 。
- 基于 Farquhar 模型更精准描述  $C_3$  作物光合:  $P_n = \min(W_c, W_j) - R_d$  。  $W_c$  为羧化限制光合速率 (与 Rubisco 酶活性、 $CO_2$  浓度相关,  $W_c = V_{cmax} \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + K_c(1 + O/K_o)}$ ,  $V_{cmax}$  为最大羧化速率,  $\Gamma^*$  为  $CO_2$  补偿点,  $K_c$  为 Rubisco 对  $CO_2$  亲和力,  $K_o$  为对  $O_2$  亲和力,  $O$  为氧浓度) ;  $W_j$  为电子传递限制光合速率 (与光强相关,  $W_j = \frac{J(C_i - \Gamma^*)}{4(C_i + 2\Gamma^*)}$ ,  $J$  为电子传递速率) ;  $R_d$  为暗呼吸速率。

○  $O_3$  胁迫 ( $O_3$  浓度与作物伤害关系) :

- 臭氧剂量指标 ( $AOT40$ ) :  $AOT40 = \sum_{i=1}^d (c_i - 40) \times t_i$  ( $c_i$  为小时平均  $O_3$  浓度,  $> 40nL/L$ ,  $t_i$  为该浓度持续时间,  $d$  为暴露天数), 用于评估  $O_3$  对作物生长影响阈值, 如小麦  $AOT40$  超过一定值 (如  $10000nL/L \cdot h$ ) 会显著减产。

## 二、模型驱动因子（气象、土壤、品种、管理等）

### 1. 气象驱动因子

#### ◦ 温度（日变化模拟）：

- 正弦曲线拟合日温变化： $T(t) = T_{avg} + A \sin(\frac{2\pi(t-t_0)}{24})$  ( $T_{avg}$  为日平均温度,  $A$  为日温振幅,  $t_0$  为最高温出现时间)。
- 基于能量平衡模型（如土壤 - 植被 - 大气传输模型  $SVAT$ ），考虑辐射、感热、潜热交换模拟温度垂直分布和变化，较复杂，简化为  $T_{soil} = f(R_n, H, L, E, \dots)$ ,  $H$  为感热通量,  $L$  为潜热通量,  $E$  为蒸散等。

#### ◦ 降水（分布与入渗）：

- 降水入渗（Green - Ampt 模型）： $i = K_s \frac{\psi_f + \Delta\theta z}{z} t$  ( $i$  为入渗量,  $K_s$  为饱和导水率,  $\psi_f$  为湿润锋水势,  $\Delta\theta$  为初始与饱和含水率差,  $z$  为湿润锋深度,  $t$  为时间)。
- 分布式水文模型中降水再分配（如 SWAT 模型），考虑地形、土壤、植被对降水截留、产流、汇流影响，涉及子流域划分、水文响应单元定义等，公式体系庞大，核心是水量平衡  $P = R + ET + \Delta S$  ( $P$  为降水,  $R$  为径流,  $ET$  为蒸散,  $\Delta S$  为土壤储水变化)。

### 2. 土壤驱动因子

#### ◦ 土壤质地（与水力参数关系）：

- 基于 Rosetta 模型估算土壤水力参数（如饱和导水率  $K_s$ 、水分特征曲线参数），通过土壤质地（砂粒、粉粒、黏粒含量  $S, F, C$ ）、容重等预测，如 van Genuchten 模型参数  $\alpha, n$  与质地相关经验关系,  $\alpha = a_1 + a_2 S + a_3 F + a_4 C$  ( $a_1 - a_4$  为拟合系数)。
- 水分特征曲线（van Genuchten 模型）： $\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^m}$  ( $\theta$  为含水率,  $\psi$  为水势,  $\theta_s$  为饱和含水率,  $\theta_r$  为残余含水率,  $\alpha, n, m$  为模型参数,  $m = 1 - 1/n$ )。

### 3. 品种驱动因子

#### ◦ 品种遗传参数（生育期、株型等）：

- 生育期遗传参数（光温敏品种）：光周期响应函数  $f(P) = \frac{1}{1 + e^{a(P-P_c)}}$  ( $P$  为光周期,  $P_c$  为临界光周期,  $a$  为响应系数)；温度响应函数  $f(T) = \frac{1}{1 + e^{b(T-T_o)}}$  ( $T$  为温度,  $T_o$  为最适温度,  $b$  为系数)；生育期模型  $D = \frac{D_{base}}{f(P)f(T)}$  ( $D_{base}$  为基础生育期)。
- 株型参数（叶倾角、叶面积分布）：叶倾角分布函数（如 Beta 分布） $f(\theta) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1}$  ( $\theta$  为叶倾角,  $\alpha, \beta$  为形状参数,  $\Gamma$  为伽马函数)；叶面积垂直分布（指数分布） $LAI(z) = LAI_{max} e^{-kz}$  ( $z$  为冠层高度,  $k$  为衰减系数)。

#### 4. 管理驱动因子

##### ○ 播种管理（密度、播期）：

- 密度与群体结构关系： $LAI = a \times D^b$ （ $D$  为种植密度， $a, b$  为品种和环境拟合参数）；播期与生育期关系（结合光温模型），如播期提前，生育期延长（若温度、光周期满足）， $D = D_0 + \Delta D$ （ $D_0$  为基础播期生育期， $\Delta D$  为播期改变引起生育期变化，由光温响应模型计算）。

- 灌溉管理（与需水模型耦合）：灌溉制度优化模型，以水分利用效率最大或产量最大为目标， $Max Y$  或  $Max WUE$ 。约束条件为土壤水分平衡（ $S_{t+1} = S_t + P_t + I_t - ET_{c,t} - R_t - D_t$ ， $S_t$  为  $t$  时刻土壤储水， $I_t$  为灌水量， $R_t$  为径流， $D_t$  为深层渗漏），结合作物胁迫响应函数，求解最优灌溉时间和水量。

##### ○ 施肥管理（养分分配与利用）：

- 养分分配模型（氮素在器官间分配）： $N_{leaf} = k_{leaf} \times N_{total}$ ， $N_{stem} = k_{stem} \times N_{total}$ ， $N_{grain} = k_{grain} \times N_{total}$ （ $k_{leaf}, k_{stem}, k_{grain}$  为氮素向叶、茎、穗分配系数，随生育期变化，如水稻灌浆期  $k_{grain}$  增大）。

- 肥料利用率模型（氮肥）： $NUE = \frac{N_{uptake}}{N_{fertilizer} + N_{soil}}$ （\$