

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， τ 为大气透射率， θ 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。

○ 光量子通量密度 (PPFD) :

单位时间单位面积上的光量子数，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°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°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 θ_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 $\theta_v = \theta_m \times \rho_b / \rho_w$ (ρ_b 为土壤容重， ρ_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 $FC \approx 30\% - 40\%$ ）。

○ 调萎系数 (PWP)： $\theta_{PWP} = \frac{\psi_{PWP}}{\psi_m}$ (ψ_{PWP} 为调萎时土壤水势，约 -1.5 MPa， ψ_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 $\psi(\theta) = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{(\theta_r)^{\frac{1}{n}} - \theta^{\frac{1}{n}}}{1 - (\theta_r)^{\frac{1}{n}}} \right)^{-m}$ ， α, n, m 为土壤参数， θ_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

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

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， Γ^* 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， $> 40 nL/L$ ， 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 10000 $nL/L \cdot h$ ）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： $T(t) = T_{avg} + A \sin\left(\frac{2\pi(t-t_0)}{24}\right)$ (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 SWAT），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， ψ_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， ΔS 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 α, n 与质地相关经验关系， $\alpha = a_1 + a_2S + a_3F + a_4C$ ($a_1 - a_4$ 为拟合系数)。
- 水分特征曲线（van Genuchten 模型）： $\theta(\psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\psi|)^n]^m}$ (θ 为含水率， ψ 为水势， θ_s 为饱和含水率， θ_r 为残余含水率， α, 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） $f(\theta) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \theta^{\alpha-1} (1-\theta)^{\beta-1}$ (θ 为叶倾角， α, β 为形状参数， Γ 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, ΔD 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)： $NUE = \frac{N_{uptake}}{N_{fertilizer} + N_{soil}}$ (\$