

一、量化预估生长发育表现相关

1. 生育期模拟（基于有效积温法）

- 生育期天数 (GDD) : $GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$, 其中 T_i 为第 i 天平均温度, T_b 为生物学下限温度, n 为生育期天数。
- 生育期模型 ($ORYZA$) : 具体公式较复杂, 简化管理为通过对光温等因子响应函数, 结合品种遗传参数, 模拟生育进程, 如抽穗期、成熟期等关键时期, 涉及光周期响应 ($P(T)$)、温度响应 ($T(T)$) 等子函数耦合, $Y = f(P(T), T(T), \dots)$, Y 为生育期相关指标。

2. 器官生长模拟（基于形态发生模型）

- 叶面积指数 (LAI) : 常见模拟如 $LAI = LAI_{max} \times f(t)$, $f(t)$ 为随生育进程变化的动态函数, 受温度、光照等环境因子及品种参数影响; 或基于光合作用 - 同化物分配模型, LAI 与同化物向叶片分配比例、叶片衰老速率等相关, 如考虑同化物分配系数 k , 叶片同化物分配量 $A_{leaf} = k \times A_{total}$, 结合叶片比叶重等参数计算叶面积。
- 群体光合（基于光合作用与呼吸作用模型）: 群体光合速率 $P_g = P_n \times LAI \times f_{attenuation}$, P_n 为单叶净光合速率, $f_{attenuation}$ 为光衰减函数 (如贝叶斯定律相关, 描述光在冠层中分布衰减); 呼吸作用 $R = R_{dark} \times Q_{10}^{\frac{T-T_{ref}}{10}}$, R_{dark} 为暗呼吸速率, Q_{10} 为温度系数, T 为温度, T_{ref} 为参考温度, 群体净光合为光合与呼吸差值。

3. 物质生产模拟（基于同化物分配）

- 干物质积累: $DM = \int_0^t (P_g - R) dt$, 即生育期内群体净光合积累的干物质, 再结合分配系数 k_i (如向茎、叶、穗分配比例), 各器官干物质 $DM_i = k_i \times DM$ 。

二、预测产量与环境响应关系相关

1. 环境因子与产量的量化关系（光合生产与产量形成）

- 光能利用: 产量 Y 与光能截获、转化相关, $Y = \varepsilon \times S \times f_{intercept} \times f_{convert}$, ε 为光能转化效率 (考虑品种、环境修正), S 为太阳辐射量, $f_{intercept}$ 为冠层光能截获率 (与 LAI 等相关, 如 $f_{intercept} = 1 - e^{-k \times LAI}$, k 为消光系数), $f_{convert}$ 为同化物向经济产量转化效率。
- 水分影响 (水分胁迫下产量模型) : 考虑水分胁迫系数 K_w (如基于土壤水分、作物需水, $K_w = f(\theta)$, θ 为土壤含水率), 胁迫下产量 $Y_w = Y_0 \times K_w$, Y_0 为充分供水下产量。
- 养分影响 (氮素与产量关系) : 氮素临界浓度法, 如 $N_c = a \times DM^b$ (a, b 为品种参数), 产量与氮素供应满足需求程度相关, 氮素不足时, $Y = Y_{max} \times \frac{N_{uptake}}{N_{demand}}$, N_{uptake} 为实际吸收氮量, N_{demand} 为需求氮量。

2. 胁迫条件下产量模拟（干旱、盐分等）

- 干旱胁迫：结合水分胁迫对光合、同化物运输等影响，如修正后的光合模型 $P'_n = P_n \times K_{w1}$ （ K_{w1} 为光合受水分胁迫系数），同化物分配系数改变（如更多同化物用于根系生长），最终产量模型综合这些修正， $Y_{drought} = f(P'_n, \text{分配系数}, \text{生育期缩短等})$ 。
- 盐分胁迫：盐分胁迫系数 $K_s = f(EC_e)$ （ EC_e 为土壤盐分浓度），对种子萌发、幼苗生长、光合等阶段抑制，产量 $Y_{salt} = Y_0 \times K_s$ ，且不同生育阶段 K_s 作用有差异，需分阶段模拟。

三、支撑精准栽培管理决策相关

1. 肥水管理决策

- 氮肥推荐：基于目标产量需氮量 $N_{target} = Y_{target} \times N_{useefficiency}$ （ $N_{useefficiency}$ 为氮素利用效率），考虑土壤基础供氮 N_{soil} ，氮肥施用量 $N_{fertilizer} = (N_{target} - N_{soil}) / N_{recovery}$ ， $N_{recovery}$ 为氮肥回收率；或通过氮素平衡模型，考虑氮素输入（施肥、灌溉等）、输出（淋失、挥发、作物吸收等），动态调整施肥量。
- 灌溉决策：基于作物需水量 $ET_c = K_c \times ET_0$ （ K_c 为作物系数， ET_0 为参考作物蒸散量，由 Penman-Monteith 公式等计算， $ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}$ ， Δ 为饱和水汽压曲线斜率， R_n 为净辐射， G 为土壤热通量， γ 为干湿表常数， u_2 为 2m 高处风速， e_s 为饱和水汽压， e_a 为实际水汽压），结合土壤有效水含量，确定灌溉时机和灌水量， $I = (\theta_{fieldcapacity} - \theta_{current}) \times Z \times \rho_b$ （ Z 为根层深度， ρ_b 为土壤容重）。

2. 种植密度优化

- 基于群体光合与竞争关系，建立密度与 LAI 、光能截获、同化物分配模型，如 $LAI = a \times D^b$ （ D 为种植密度， a, b 为拟合参数），通过模拟不同密度下群体光合、干物质积累及分配到经济器官比例，找到最优密度 $D_{optimal}$ 使 $Y = f(LAI, \text{分配比例}, \text{生育期})$ 最大。

四、优化资源利用效率（光、水、肥）相关

1. 水分利用效率优化

- 水分利用效率 $WUE = \frac{P_n}{ET}$ （ P_n 为净光合速率， ET 为蒸腾蒸发量），通过灌溉调控（如调亏灌溉，在非关键生育期适度控水）、品种选择（选高 WUE 品种）等提升，模型上可表示为 $WUE' = WUE \times K_{regulation}$ （ $K_{regulation}$ 为调控措施系数）。

2. 肥料利用效率优化

- 氮肥利用效率 $NUE = \frac{Y_{increase}}{N_{fertilizer}}$ （ $Y_{increase}$ 为施肥后产量增加量），通过精准施肥（变量施肥，基于土壤肥力空间变异， $N_{fertilizer} = N_{base} + \Delta N \times f(soilmap)$ ， $soilmap$ 为土壤肥力分布图）、肥料深施、缓释肥应用等提升，模型中修正氮素损失途径系数（如挥发系数 $K_{volatilization}$ 降低）， $N_{loss} = N_{fertilizer} \times K_{volatilization} + N_{fertilizer} \times K_{leaching}$ （ $K_{leaching}$ 为淋失系数），从而提高 NUE 。