# WOFOST的理论背景

WOFOST将系统分析和模拟应用于农业生产，WOFOST的主要特点是：系统、模型和模拟。系统是现实的简化，包含现实中相互关联的元素；模拟是为了建立数学模型，并参照他们所代表的系统研究这些系统的行为。WOFOST是这个系统的一个模型，通过运行WOFOST，可以模拟该系统。

在定义WOFOST模型前首先要明确数学模型的概念，数学模型可以分为描述性（统计性、随机性）模型和解释性（确定性、过程性）模型；描述性模型通常以相对简单的方式描述模型的行为，并且很少或没有反映导致这种行为的机制。它是由所研究的变量之间的统计关系推导出来的。一个解释性模型包括对所涉及的主要过程的定量描述。在模型中，这些过程是基于对其相互作用的理解而相互关联的。因此，在较低的集成级别上起作用的进程，例如。单片叶子的光合作用-光响应曲线，与其他过程集成，以解释在一个更高的集成水平上的系统行为，例如，作物的生长。第三个区别是包括时间作为变量的动态模型和不以时间作为变量的静态模型。

WOFOST是一个动态的、解释性的模型。它基于较低集成水平的过程知识，以一天的时间步长模拟作物生长。然而，模型的某些部分是描述性的或静态的。这主要是由于所涉及的一些过程尚未得到充分的理解。在WOFOST中使用了状态速率变量方法。这种方法是基于系统的状态可以随时被量化，并且系统中的变化可以用数学方程来描述的假设。在模型中可以区分状态、速率和驱动变量。状态变量是指生物量或土壤含水量。驱动变量（或强制函数）描述了外部因素对系统的影响，但不受系统内过程的影响。例如，宏观气象变量，如辐射、气温和降水。速率变量表示状态变量在特定时刻和特定时间步长上变化的速率，根据状态和驱动变量计算速率变量。

# 作物生长模拟

## 一般特性

在WOFOST中，基于生态生理过程模拟作物生长，主要过程为物候发育、光吸收、CO2 同化、蒸腾、呼吸作用、同化物分配到各器官，以及干物质的形成。以一天为时间步长，对潜在和限水条件下作物生长进行动态模拟。养分限制下的产量是在土壤特性和限水条件的基础上进行计算的。

## 同化和呼吸

作物的每日总二氧化碳同化率是根据被吸收的辐射和单个叶子的光合作用-光响应曲线计算出来的。光合作用取决于温度和叶子的年龄；吸收辐射由总辐射和叶片面积计算出来。由于光合作用以非线性的方式响应光强度，辐射水平的变化已经被考虑在内。

第一种辐射变化是在垂直方向，植被的上层叶片比下层叶片接收更多的光线，因此，将树冠层分成不同的叶层来解释的，每个叶层的拦截辐射量是根据冠层顶部的辐射通量和覆盖层的传输来计算的。根据单个叶的光合作用-光响应曲线，计算每个叶层的同化率。。

第二种变化是时间性的，是由太阳的日周期引起的。在晴朗的一天里，树冠顶部的辐射水平等于太阳常数乘以太阳和地球表面之间的角的正弦

## 物候发育

植物器官和生殖器官的出现顺序和出现率是作物物候发育的特征，在WOFOST中，用无量纲状态变量发展阶段(variable development stage，DVS)来描述。对于大多数一年生作物，幼苗出现时DVS为0，开花时为1，成熟时为2。

发育阶段决定了同化物在器官上的分配(叶、茎、根、贮藏器官)。发芽后，大部分同化物转化为叶和根组织，后期转化为茎组织。如果发育阶段等于1 (谷物中的花期)，对根组织的分配逐渐减少并为零。从那时起，储藏器官接收大部分可用的同化物。

在三个不同的生长阶段，地上器官分配干物质的例子(荷兰大麦，模拟)。

一小部分同化首先被分配到根，其余的被分配在地上器官（包括地下储存器官，如块茎）。要启动模拟，必须知道作物出现时的干重。初始叶片面积指数[m2.m-2或ha ha-1]通过DVS=0的划分机制从初始干重得出。

从作物生长开始，叶片的吸收供应决定了叶面积的增加，通过计算叶的干物质重量与特定叶面积得到。然而，叶面积的扩大可能会受到叶面积指数的最大日增长的限制。细胞分裂和扩展的最大速率)与温度有关。叶面积的增加会导致更高的（潜在的)光拦截，从而导致更高的潜在生长速率。这导致了作物的指数增长，一直持续到几乎所有的光都被拦截（叶面积指数大于3）。从那时起，生长速率恒定，直到叶片面积及其光合能力因作物老化而下降。

## 蒸腾作用

蒸腾是作物流向大气的水分。水的损失是由水蒸气从开放的气孔扩散到大气中造成的。气孔需要开放以与大气交换气体（CO2和O2）。为了避免干燥，作物必须通过从土壤中吸收水分来弥补蒸腾量的损失。在WOFOST中，植物生长的最佳土壤水分范围是根据大气的蒸发需求（参考固定树冠的潜在蒸腾量）、作物组和总土壤水分保持能力的函数来确定的。在此范围内，蒸腾损失得到完全补偿。在最佳范围之外，土壤可能会太干燥或太湿。这两种情况都导致减少根系的水分吸收，缺水的干燥土壤，缺氧的潮湿土壤。

作物随着气孔的闭合而对水的压力做出反应。因此，作物和大气之间的二氧化碳和O2的交换减少了，因此二氧化碳的同化也减少了。这种效应被量化，假设蒸腾量与总同化的比率恒定。根据等式计算得到

速率的比率；Tp：潜在的蒸腾率；Ap：潜在的同化率

潜在的蒸腾速率取决于叶片面积和大气的蒸发需求。蒸发需求包括辐射水平、蒸汽压差和风速。

土壤含水量（第5.3.5节）与Ta/Tp比率之间的关系如图下图所示，在临界土壤含水量（cr）和土壤容量（fc）之间，该比率为1，允许潜在的蒸腾量。在此范围之外，该比率小于1，从而导致蒸腾量减少。在永久枯萎点wp和饱和点s，蒸腾和作物生长停止。wp、fc和s取决于土壤类型。cr取决于作物类型和天气。高蒸发需求和干旱敏感作物的组合导致cr值较高。作物的耐旱性为土壤消耗数，耐旱敏感作物为1.0，耐旱作物为5.0。

作物/土壤组合的土壤含水量和Ta/Tp之间的关系。（虚线代表在同一田间条件下更抗旱的物种，或在不同天气条件下造成的蒸发需求较低情况下的同一物种）

## 土壤得水平衡

根区的含水量来自于每天的水平衡计算。在WOFOST中，区分了三种不同的土壤水子模型。第一个也是最简单的土壤水平衡适用于潜在的生产情况。假设土壤持续湿润，作物需水量被量化为树冠下阴影土壤的作物蒸腾和蒸发的总和。

水有限生产情况下的第二种水平衡适用于自由排水的土壤，其中地下水太深，不能影响生根带的土壤水分含量。土壤剖面分为两个隔间，即根区和实际生根深度和最大生根深度之间的较低区。生根深度以下的基土未定义。随着根的变深，第二个区域逐渐与第一个区域合并。这种土壤水平衡的原理是级联（溢水桶）。降雨渗入，一部分可能暂时储存在表面以上或流失。计算了蒸散量损失。超过土壤分区保留能力的渗透水会向下渗透。没有毛细血管的上升。

第三种水平衡是对生根带浅层地下水影响的土壤的限制生产。这些原则类似于自由排水的情况。不同的是，土壤的水分保持能力由地下水的深度决定，也由渗透率决定。如果扎根的土干燥，毛细血管就会上升。地下水位可通过人工排水进行控制，根系区内含水量不随深度变化。

土壤分为三个分区：实际生根带(RDact)、实际生根带与地下水位之间的区域，以及地下水带向下至土壤地表以下1000cm的深度。最大生根区为RDm。地下水位的深度为Z（如下图）。当地下水进入生根带时，生根带又细分为水饱和区和非饱和区。

水通量的计算包括参数降雨(R)、地表储存(SS)、地表径流(SR)、土壤地表蒸发(E)、作物蒸腾(T)、根带到深层的渗透(PC)和毛细管进入根带(CR)（图27）。WOFOST不考虑灌溉或斜坡上较高位置的地表径流供水。

如果需要，一个单独的模块可以计算最早的播种日期。它只针对荷兰的条件进行了校准。该模块模拟顶部土层的土壤水状态。用户必须指定最早和最新的可能日期。WOFOST通过模拟表土中多余的水分量，通过计算降雨减去渗透和蒸发造成的水分损失来寻找合适的播种日期。

假定水从苗床渗入土壤的速率等于恒定速率（SPO \*\*）加上瞬时过量水的一部分（SPA \*），变量SPO\*\*和SPA\*\*均为土壤特有的，与所需播种床的深度有关。深和浅、砂质土壤的值高于粘土土壤，浅层种子床也高于深层种子层。目前在WOFOST中应用的值是经验校准的结果，只有当湿土壤的表层必须变得更干燥才能进行种子床准备时才有意义。当种子的含水量低于外部定义的阈值时，当天被算为工作日。播种发生在连续第三天的工作日期，或在最迟可能的播种日期。

## 养分

WOFOST可以计算非施肥土壤和发挥潜能和水分限制所需的植物营养素数量生产水平。仅占了N，P和K这三种宏观营养素。根据QUEFTS模型执行计算，它已集成到WOFOST中。可以在Keulen和Wolf（1986）和Keulen（1982）中找到如何在WOFOST中使用QUEFTS元素以及需要什么样的数据。

作物的生物固氮技术。与根瘤菌共生。已包含在WOFOST中。作物参数NFIX决定由生物固定提供的总氮供应的比例。NFIX被定义为常数，而实际上固氮取决于土壤中可用的矿物氮量。

营养物质有限的产量是根据施肥土壤中宏观营养物质N、P、K的可用性来计算的。此外，还计算了上一季模拟的潜在产量的养分需求，以及最后一系列运行的平均产量的水分限制产量的养分需求。在潜在生产和水限制生产的计算中，该模型假设应用肥料来达到这些生产水平。对于肥料，使用持续明显的肥料回收。营养摄取和营养应用之间的比率。

氮是氮的潜在供应和土壤中其他营养物质的潜在供应的函数。潜在的营养供应被定义为当所有其他营养都没有限制时，作物所吸收的量。这个数量是作物特有的，可以通过所有其他营养物质供应充足的实验来确定。这需要多年来进行大量的实地试验。当在不同的土壤类型上重复出现时，潜在的营养物质供应可能与土壤特性，如pH、有机碳含量、P-Olsen和可交换的钾有关。