

# 作物最高气候产量及其计算方法\*

据世界粮农组织研究，作物最高气候产量主要取决于其遗传特性和对环境条件（包括气候、土壤和水份等）的适应性。在气候因子中，温度和辐射是最重要的，此外，各种作物开花还对日长有不同的要求。一般说来，温度决定着作物的发育速度及总生长期长度，辐射对产量形成有重要的影响。由于各种作物及其不同品种，对外界环境条件的要求各不相同，因此，要正确选择作物，就要根据环境条件的不同组合进行

综合考虑。表1中列出了部份作物对主要环境条件的要求，其中包括作物的总需水量( $ET_m$ )和水份利用效率( $E_y$ )。

为了确定某种作物最适宜的生产地区，需要计算不同气候条件下的最高产量。目前有两种计算方法：一是国际土地开垦和改良研究所的瓦格尼根方法；二是卡萨姆方法。

表 1

作物对气候和水份条件的要求

作物	全生育期 (天)	最适温度 <sup>1)</sup> (温度范围) (°C)	开花 对日长 的要求	受特殊气候限制及要求	总需水量 (毫米)	对水份供应 的敏感性 <sup>2)</sup> ( $K_y$ )	收获量的水份利用效率 $E_y$ , 公斤/米 <sup>3</sup> (含水量%)
香 蕉	300—365	25—30 (15—35)	中	对霜冻敏感，较长期<8°C 有严重危害，要求高相对湿度	1200—2000	高 (1.2—1.35)	种植作物 2.5—4 新生枝 3.5—6 果 (70%)
柑 枝	240—365	23—30 (13—35)	中	对霜冻(休眠期较轻)、大风、高湿敏感，冬季凉爽或短期干燥较好	900—1200	低—中高 (0.8—1.1)	2—5 果(85%) 菜姆酸橙(70%)
棉 花	150—180	20—30 (16—35)	短或中	对霜冻敏感，怕大风或冷风，棉铃期要求27—32°C (18—38)成熟期要求干燥	700—1300	中低 (0.85)	0.4—0.6 籽棉(10%)
玉 米	100—140	24—30 (15—35)	中或短	对霜冻敏感，发芽温度>10°C，低温会给成熟造成问题	500—800	高 (1.25)	0.8—1.6 粒(10—13%)
水 稻	90—150	20—30 (18—35)	短或中	对霜冻敏感，低温会引起不育，昼夜温差小有利	350—700	高	0.7—1.1 稻谷(15—20%)
大 豆	100—130	20—25 (18—30)	短或中	对霜冻敏感，有些品种开花期要求温度>24°C	450—700	中低 (0.85)	0.4—0.7 粒(6—10%)
甘 蔗	270—365	22—30 (15—35)	长或中	对霜冻敏感，成熟期要求10—20°C，干燥、多日照	1500—2500	高 (1.2)	甘蔗 5—8(80%) 糖 0.6—1.0(0%)
小 麦	春100—130 冬180—250	15—20 (10—25)	中或长	春麦对霜冻敏感，冬麦休眠期抗霜冻，后期敏感	450—650	中高 (春麦1.15) (冬麦1.0)	0.8—1.0 粒(12—15%)

注：1)为日平均温度；2)整个生育期的  $K_y$ ， $K_y < 0.85$  低， $K_y = 0.85 - 1.0$  中低， $K_y = 1.0 - 1.15$  中高， $K_y > 1.15$  高。

## 一、瓦格尼根方法

根据德威特(De Wit, 1965)的理论，用辐射和蒸散资料计算了作物在给定的气候条件下的可能生产潜力。为了计算经济产量(即作物有效收获产量)，需要用作物隶属常数和温度效应、生产效率的表达式对该方法作些修正。因为在校正该方法时用的是试验田的产量资料，所以必须把计算的试验田的产量(Y试验)订正到实际农业耕作条件下能够获得的产量水平。对给定的地区来说，可以把Y试验看作是在高水平的水

份和作物管理条件下能够获得的产量。

计算Y试验的步骤如下：

1. 计算标准作物的总干物质产量 Y 总

计算Y总(公斤/公顷·日)是以入射有效短波辐射量为依据的：

$$Y_{\text{总}} = F \cdot Y_{\text{阴}} + (1 - F) Y_{\text{晴}} \quad (1)$$

F 为白天云的覆盖率，或  $F = (R_{\text{晴}} - 0.5 R_{\text{实}}) / 0.8 R_{\text{晴}}$

\* 本文摘编自《Yield-response to water》FAO, 1979。

R<sub>晴</sub>，其中R<sub>晴</sub>为晴天的最大有效短波辐射（表2），R<sub>实</sub>为实测的入射短波辐射；Y<sub>阴</sub>为阴天作物的总干物质生产速度（表2）；Y<sub>晴</sub>为晴天作物的总干物质生产速度（表2）。

## 2. 气候影响订正 (ETm/d)

表2 R<sub>晴</sub> (卡/厘米<sup>2</sup>·日) 及 Y<sub>晴</sub>、Y<sub>阴</sub>  
(公斤/公顷·日)  
(根据德威特, 1965)

北纬	要素	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
20°	R <sub>晴</sub>	375	394	400	399	386	357	313
	Y <sub>晴</sub>	439	460	468	465	451	425	387
	Y <sub>阴</sub>	235	246	250	249	242	226	203
30°	R <sub>晴</sub>	363	400*	417*	411*	384*	333	270
	Y <sub>晴</sub>	437	471*	489*	483*	456*	412	356
	Y <sub>阴</sub>	232	251*	261*	258*	243*	216	182
40°	R <sub>晴</sub>	339	396	422	413	369	298	220
	Y <sub>晴</sub>	427	480	506	497	455	390	314
	Y <sub>阴</sub>	223	253	268	263	239	200	155

\* 为实例中选用的资料。

表3 四种作物的订正系数(K, C<sub>温</sub>, C<sub>经济</sub>)

作物	K	C <sub>温</sub>							C <sub>经济</sub>	
		整个生长期平均温度 (℃)								
		5	10	15	20	25	30	35		
苜 菴	0.9	0	0.2	0.4	0.55	0.6	0.6	0.5	0.4—0.5 <sup>①</sup> 0.8—0.9 <sup>②</sup>	
玉 米	1.9	0	0.1	0.35	0.5	0.6*	0.6*	0.6	0.4—0.5	
高 粱	1.6	0	0.1	0.3	0.45	0.55	0.6	0.6	0.35—0.45	
小 麦	春 1.17 冬 0.65	0.05	0.3	0.55	0.6	0.35	0.1	0	0.3—0.4	

①为第一年, ②为以后年份, \* 为实例中选用的资料。

总之，在适宜气候条件下种植高产品种，其试验条件下的产量(Y<sub>试验</sub>)是：

$$Y_{\text{试验}} = K \cdot C_{\text{经济}} \cdot C_{\text{温度}} \cdot G \cdot Y_{\text{总}} \cdot ET_m / d \quad (2)$$

单位是公斤/公顷·时期。

分别将各种作物的各项订正系数代入上式，即可求出该作物的Y<sub>试验</sub>。下面举一个实例：

已知在30°N，海拔95米处有一块种植密度适宜的玉米地，全生育期从5月1日至8月31日共123天，全生育期平均入射短波辐射(R<sub>实</sub>)为650卡/厘米<sup>2</sup>·日，平均温度27.5°C，平均相对湿度55%，平均最大蒸散量(ET<sub>m</sub>)为6.8毫米/日，经济产量订正系数(C<sub>经济</sub>)为0.45。

由表2 30°N栏，按5、6、7、8四个月平均，得出Y<sub>阴</sub>为253公斤/公顷·日，Y<sub>晴</sub>为475公斤/公顷·日，R<sub>晴</sub>为403卡/厘米<sup>2</sup>·日。

除太阳辐射外，作物的生产速度还与总生长期内平均最大蒸散量(ET<sub>m</sub>，毫米/日)和平均饱和差(d，毫巴)之比密切相关。ET<sub>m</sub>是用彭曼(Penman)方法计算的。

## 3. 作物种类订正 (K)

为了建立标准作物总干物质产量(Y<sub>总</sub>)与苜蓿、玉米、高粱和小麦总干物质产量(Y<sub>总</sub>·ET<sub>m</sub>/d)的关系，利用了一些根据经验推导的作物常数K值(表3)。

## 4. 温度订正 (C<sub>温</sub>)

标准作物的总干物质产量(Y<sub>总</sub>)用标准温度条件下的产量表示。因为植物在生长和呼吸过程中要消耗掉总能量的40%左右，所以为获得在全生育期间各种日平均温度下的净干物质产量(Y<sub>净</sub>)，就要用一个作物的特定温度订正系数(C<sub>温</sub>)来进行订正(表3)。对于种植密度最适宜的作物来说，Y<sub>净</sub> = K · C<sub>温</sub> · G · Y<sub>总</sub> · ET<sub>m</sub>/d，单位是公斤/公顷·时期，其中Y<sub>总</sub>取整个生长期(多年平均)为G的日平均值。

## 5. 经济产量订正 (C<sub>经济</sub>)

一般说来，经济产量只占全部干物质的一部份。除多年生的苜蓿第一年与以后年份的经济产量订正系数不同外，其余各种作物的经济产量(籽粒收获量)约占全部干物质产量的30%—50%(表3)。

$$F = (403 - 0.5 \times 650) / (0.8 \times 403) = 0.24,$$

$$Y_{\text{总}} = (0.24 \times 253) + (1 - 0.24) \times 475$$

$$= 422 \text{ 公斤/公顷} \cdot \text{日},$$

$$ET_m = 6.8 \text{ 毫米/日},$$

查表得平均温度为27.5°C时的最大水汽压 = 36.8毫巴；相对湿度为55%时的水汽压 = 36.8 × 55% = 20.2毫巴；d = E - e = 36.8 - 20.2 = 16.6毫巴；

$$C_{\text{温}} \text{ 为 } 0.6, C_{\text{经济}} \text{ 为 } 0.45$$

将上述各项系数代入(2)式得：

$$Y_{\text{试验}} = 1.9 \times 0.45 \times 0.6 \times 123 \times 422 \times 6.8 / 16.6 \\ = 10910 \text{ 公斤/公顷 (干粒重)}$$

## 二、卡萨姆方法

根据德威特的理论，用辐射资料计算标准作物的可能潜在产量(Y<sub>潜</sub>)，即在计算标准作物总干物质产量(Y<sub>总</sub>)的基础上，对作物在给定气候条件下受遗

传学制约的生产过程进行若干订正。本方法的假定条件是，气候条件满足作物生长的要求，并且水份、养份、盐度以及病虫等均不影响作物生长及其潜在产量。

在实际的农业生产条件下，由于短时期的不利气候条件、有限的水份和养份供应以及不适当的农业操作等原因，产量会受到一些损失。这些限制性因素是综合的，难以定量地估计它们对产量的影响。然而，若把实际产量与计算的潜在产量进行比较，即可得出农业生产效率指标。

计算 $Y_{\text{潜}}$ 的步骤如下：

#### 1. 计算标准作物的总干物质产量 ( $Y_{\text{总}}$ )

计算公式同(1)式，式中的 $F$ 中的 $R_{\text{实}}$ 也可以用测量的日照时数 ( $n$ , 小时/日) 进行计算。

#### 2. 不同作物类型的温度订正

总干物质产量是作物种类和温度的函数。假定标准作物的最大生产速度 ( $Y_{\text{最大}}$ ) 为20公斤/公顷·小时左右，则各类作物在不同温度下的 $Y_{\text{最大}}$ 如表4所示。在按(1)式计算 $Y_{\text{总}}$ 时，就要按作物种类及温度情况对 $Y_{\text{晴}}$ 和 $Y_{\text{阴}}$ 的系数进行订正：

1) 当 $Y_{\text{最大}} > 20$ 公斤/公顷·时时，

$$Y_{\text{总}} = F(0.8 + 0.01Y_{\text{最大}})Y_{\text{阴}} + (1 - F)(0.5 + 0.025Y_{\text{最大}})Y_{\text{晴}} \quad (3)$$

2) 当 $Y_{\text{最大}} < 20$ 公斤/公顷·时时，

$$Y_{\text{总}} = F(0.5 + 0.025Y_{\text{最大}})Y_{\text{阴}} + (1 - F) \times (0.05Y_{\text{最大}})Y_{\text{晴}} \quad (4)$$

表4 各种温度条件下各类作物的 $Y_{\text{最大}}$   
(公斤/公顷·时)

作物类别	平均温度 (°C)								
	5	10	15	20	25	30	35	40	45
I 凉	5	15	20	20	15	5	0	0	0
I 暖	0	0	15	32.5	35	35	32.5	5	0
II 凉	0	5	45	65	65	65	45	5	0
II 暖	0	0	5	45	65*	65	65	45	5

注：I凉为苜蓿、菜豆、甘蓝、豌豆、马铃薯、番茄、糖用甜菜、小麦等作物；

I暖为苜蓿、柑桔、棉花、花生、青椒、水稻、红花、大豆、烟草、番茄等作物；

II凉为某些玉米和高粱品种；

II暖为玉米、高粱、甘蔗等作物。

#### 3. 作物生育期的叶面积订正 ( $C_{\text{叶}}$ )

一般说来，作物生育中期的生长速度最大，生育始期和末期的生长速度较小。或者说，全生育期的平均生长速度约相当最大生产速度的50%。其假设条件是，标准作物的有效叶面积5倍于地面，即叶面积指数 ( $I_{\text{叶面}} = 5$ )。当叶面积指数较小时，必须进行订正；当叶面积指数大于5时，其影响很小(表5)。

#### 4. 净干物质生产订正 ( $C_{\text{净}}$ )

植物在其生产过程中，为维持干物质生产需要能量。只能利用剩下的能量生产新的物质，在凉爽条件下(平均温度<20°C)，这部分能量约占0.6，在温暖

表5 作物各发育期的叶面积订正系数 ( $C_{\text{叶}}$ )

1叶	1	2	3	4	$\geq 5$
$C_{\text{叶}}$	0.2	0.3	0.4	0.48	0.5*

条件下(平均温度>20°C)，约占0.5。即 $C_{\text{净}} = 0.5 - 0.6$ 。

#### 5. 经济产量订正 ( $C_{\text{经济}}$ )

一般来说，在全部干物质中只有一部分诸如籽粒、糖或油是经济产量。表6给出了高产品种在灌溉条件下经济产量和净干物质之比，用经济产量指数 ( $C_{\text{经济}}$ ) 表示。

表6 高产品种在灌溉条件下的经济产量指数 ( $C_{\text{经济}}$ )  
(均以干重计)

作物	产品	$C_{\text{经济}}$	作物	产品	$C_{\text{经济}}$
菜豆	粒	0.25—0.35	高粱	粒	0.3—0.4
棉花	棉绒	0.08—0.12	大豆	粒	0.3—0.4
花生	米	0.25—0.35	甜菜	糖	0.34—0.45
玉米	粒	0.35—0.45*	甘蔗	糖	0.2—0.3
豌豆	粒	0.3—0.4	向日葵	籽	0.2—0.3
青椒	椒	0.2—0.4	烟草	叶	0.5—0.6
马铃薯	块根	0.55—0.65	番茄	果	0.25—0.35
稻	粒	0.4—0.5	小麦	粒	0.35—0.45

总之，在生育期不受限制的条件下，种植气候上适宜的高产品种的潜在产量 ( $Y_{\text{潜}}$ ) 为：

1) 当 $Y_{\text{最大}} > 20$ 公斤/公顷·时时，

$$Y_{\text{潜}} = C_{\text{叶}} \cdot C_{\text{净}} \cdot C_{\text{经济}} \cdot G [F(0.8 + 0.01 \times Y_{\text{最大}})Y_{\text{阴}} + (1 - F)(0.5 + 0.025Y_{\text{最大}})Y_{\text{晴}}] \quad (5)$$

2)  $Y_{\text{最大}} < 20$ 公斤/公顷·时时，

$$Y_{\text{潜}} = C_{\text{叶}} \cdot C_{\text{净}} \cdot C_{\text{经济}} \cdot G [F(0.5 + 0.025 \times Y_{\text{最大}})Y_{\text{阴}} + (1 - F)(0.05Y_{\text{最大}})Y_{\text{晴}}] \quad (6)$$

以上两式的单位均为公斤/公顷·时期。

下面对第一种方法相同的例子进行计算。即作物为玉米，地点30°N；总生长期(G)为123天(5月1日—8月31日)；I叶为5；生育期平均入射短波辐射( $R_{\text{实}}$ )为650卡/厘米<sup>2</sup>·日( $F = 0.24$ )；平均温度为27.5°C。

由表4查出，玉米在25—30°C时， $Y_{\text{最大}}=65$ 公斤/公顷·时，应使用(5)式计算。

由表5、第4节及表6分别得出 $C_{\text{叶}}=0.5$ 、 $C_{\text{净}}=0.5$ 、 $C_{\text{经济}}=0.4$ 。

将上述各项代入(5)式，即可求出

$$\begin{aligned} Y_{\text{潜}} &= 0.5 \times 0.5 \times 0.4 \times 123 [0.24(0.8 + 0.01 \\ &\quad \times 65)253 + (1 - 0.24)(0.5 + 0.025 \times 65) \\ &\quad \times 475] \\ &= 10520 \text{ 公斤/公顷 (干重)} \\ &\quad (\text{元来福 编译}) \end{aligned}$$