

粮食作物与气象

liangshi zuowu yu qixiang

龚绍先 主编



北京农业大学出版社

粮食作物与气象

龚绍先 主编

1980

责任编辑：高欣

封面设计：雷克敬

粮食作物与气象

龚绍先 主编

*

北京农业大学出版社出版
(北京海淀区圆明园西路2号)

北京市华生印刷厂印刷

新华书店首都发行所发行

*

850×1168毫米1/32 12.5印张 325千字
1988年9月第1版 1988年9月第1次印刷

印数：5 000

ISBN 7-81002-049-8/S·49

定 价： 4.20元

编 者 的 话

作物气象学是农业专业气象学中的一个重要分支。我国现代作物气象的研究始于本世纪20年代初，著名气象学家竺可桢指出，“五谷之所以能长茂者，全赖气候之适宜”。自50年代以来，中国农业科学院和中国科学院以及高等农业院、校等有关单位，先后对小麦、水稻、棉花、蔬菜等作物生育的气象条件和作物生态分布、农业气象产量预报等作了研究，先后出版了“冬小麦生长发育条件的农业气象鉴定”、“水稻与气象”等有关著作。70年代以来对各种作物的主要农业气象灾害——如干旱、干热风、低温冷害、越冬冻害等进行了广泛的研究。

在国外，近20年来，世界气象组织及有关科研机构的农业气象、气候和农学家们对作物生育及产量形成的各种农业气象问题进行了大量工作。仅世界气象组织就连续编著并出版了“水稻与天气”（Rice and Weather, 1975）、“小麦农业气象学”（Agrometeorology of the Wheat Crop, 1974）、“玉米农业气象学”（Agrometeorology of the Corn Crop, 1977）、“水稻农业气象学”（Agrometeorology of the rice Crop, 1980），以及“天气—作物模式指南”（Guidelines on Crop-Weather models, 1983）等一系列专著和专题技术报告。

面对作物气象研究这种蓬勃发展的形势，1985年北京农业大学农业气象系的有关教师协同南京气象学院、山东省农科院、山西省农科院等单位从事作物气象研究的同志，编写了小麦、水稻、棉花、大豆、玉米、甜菜、甘薯、甘蔗、麻类、粟（谷子）、高粱、油菜、莜麦和花生等14种粮食及经济作物气象书稿。有关内容已在北京农业大学“专业气象”课上讲授两遍，并广泛征求热

心这门学科的老师 and 同学们的意见。现在首先将小麦、水稻等 8 种粮食作物与气象书稿整理出版。

我们希望本书能对我国农业专业气象工作有所裨益，为我国农业现代化的发展尽一点绵薄力量。限于编者水平，书中不妥或错误之处，敬希读者指正。

编者分工：

- 第一章 龚绍先 （北京农业大学）
- 第二章 龚绍先 （北京农业大学）
- 第三章 陶炳炎 （南京气象学院）
- 第四章 刘汉中 （北京农业大学）
- 第五章 曲曼丽 （北京农业大学）
- 第六章 荆淑民 （山东省农科院）
- 第七章 何少斌 （山西省农科院）
- 第八章 张 林 （内蒙古气象局）
- 第九章 赵明斋 （山东省烟台农校）

编者 1987年12月

目 录

第一章 作物气象与作物气象模式

第一节 作物气象····· (1)

第二节 作物气象模式····· (4)

第二章 小麦气象

第一节 世界和我国小麦生产概况及生态分布····· (15)

第二节 光温因子对小麦发育的影响····· (19)

第三节 小麦播种与气象条件的关系····· (27)

第四节 小麦分蘖与气象条件的关系····· (31)

第五节 小麦幼穗分化与气象条件的关系····· (39)

第六节 小麦生育后期的农业气象条件····· (50)

第七节 小麦的光能利用率及提高途径····· (58)

第八节 小麦生长发育的水分条件····· (64)

第九节 小麦品质与气象条件关系····· (72)

第十节 小麦的农业气象灾害····· (76)

第十一节 中国小麦综合气候区划····· (87)

第三章 水稻气象

第一节 气象要素对水稻生育的影响····· (102)

第二节 产量构成因素形成与气象条件的关系····· (125)

第三节 水稻栽培与气象····· (141)

第四节 水稻气象灾害····· (164)

第五节 中国水稻气候区划····· (175)

第四章 大豆气象

绪 言····· (191)

第一节	气象因子与大豆生育的关系	(195)
第二节	气象条件与大豆栽培	(217)
第三节	大豆的生态类型与地理分布	(226)
第四节	大豆的品质与气象条件的关系	(232)
第五章	玉米气象	
第一节	我国玉米种植的气候生态条件	(240)
第二节	玉米生长发育与气象条件的关系	(245)
第三节	玉米丰产栽培的农业气候问题	(266)
第六章	甘薯气象	
绪 言		(289)
第一节	甘薯的起源、分布与生态区划	(291)
第二节	甘薯生长与气象条件的关系	(298)
第三节	气象条件与甘薯的丰产栽培	(322)
第七章	粟(谷子)气象	
绪 言		(338)
第一节	我国谷子分布及种植区划	(338)
第二节	谷子生长发育的农业气象条件	(340)
第三节	谷子生产中的农业气象问题	(350)
第四节	气象条件与谷子病虫害	(358)
第八章	莠麦气象	
绪 言		(363)
第一节	莠麦生育对气象条件的要求	(363)
第二节	莠麦的气象灾害	(372)
第九章	高粱气象	
第一节	高粱生长发育与气象条件关系	(376)
第二节	高粱不同生育阶段与气象条件关系	(384)

第一章 作物气象与作物气象模式

第一节 作物气象

作物气象学是研究作物地理分布、生长发育、产量形成和产品品质等与气象条件的相互联系、并为作物合理布局和丰产栽培而服务的一门科学。作物生产的实质是一个能量转换、物质循环和积累的过程。在自然条件下，光、热、水、气等气象要素，既是作物的基本生活因子，又是环境因素的重要组成部分，因此，气象因子除提供能量并参与作物的物质循环和积累过程外，其数量和组合在时、空范围内的变化，还制约着作物品种的分布、适应范围和生育状况。研究和掌握作物对气象条件的要求及其反应的规律，建立作物——气象模式与管理措施程序，结合农业气象监测和预报，可为合理的利用气候资源，趋利避害，改善田间小气候，以及提高农作物产量等提供充分的气象依据。

在影响作物生长发育和最终产量形成的外界气象因素中，首先考虑的是光，它是农业生态系统的能量源泉。在作物群体光合生产中，光照强度对作物有机物质的积累和品质优劣有重要意义，当光强度处于光补偿点和饱和点之间时，光合作用速率随光强度增加而增加。喜光植物（如棉花、向日葵等）只有在太阳直射光下才能正常生长，直射光是干物质积累的主要能量来源，漫射光的强度比直射光弱，但光合有效辐射多，被作物利用的效率高，某些耐荫植物（如茶叶、人参等）生长在漫射光条件下产量高、品质好。

光对作物生育的影响，还表现在光刺激作用，即光为作物提供信息，影响其生理、生态过程。光对植物体色素的形成、细胞原生质的粘度及其流动等有重要作用。某些植物的器官有显著的趋光性，并可作自动调节运动。作物群体为适应光照强弱，以茎叶密度的消长进行控制调节。不同波段的太阳辐射光谱对植物有不同的作用，并能引起植物相应的反应。一年中某个季节白天与黑夜的交替及其时间长度的变化引起植物的光周期效应；同一植物的不同品种，也有感光性强弱之分，等等，这些都与日长变化和光刺激有关。

光条件在作物生产力形成中是个重要的环境因子，但光是非限制因子，在当前农业生产水平下，重点是温度与水分。

温度是通过强度、持续时间和时空变化影响作物的生长发育。作物的生命活动温度范围约为 $-10-50^{\circ}\text{C}$ ，在这个范围内温度升高 10°C ，作物的生理生化反应速度增加1—2倍。在作物生命过程中有最适、最高和最低三个基本点温度，在最适温度下作物生长发育迅速而良好，在最高、最低温度下，作物停止生长发育，但仍能维持生命。不同作物或不同品种的不同生育时期，三基点温度是不同的。

作物的生育速度既与温度高低有关，又受其持续时间的的作用。作物的积温指标常用来表示它们的综合影响，并用来分析农作物的热量条件。例如，广东省大于或等于 10°C 的活动积温可高达 $8000-10000^{\circ}\text{C}$ ，水稻可以一年三熟，为热带、亚热带作物生长区。黑龙江省北部为 2000°C 左右，为一年一熟喜凉作物生长区。青藏高原有很大面积的地区低于 1000°C ，基本无作物生长。

水分与作物生育关系更是十分密切，它一方面是作物光合作用、合成碳水化合物的主要原料之一，又是作物体内输送养分的载体。降水量是评价一个地区作物水份供应状况的重要指标，但对作物生育影响主要是土壤水分，或者说决定于土壤水分平衡状

况。在土壤水分平衡各分量中，主要收入项是降水量，蒸发量（在作物覆盖下为蒸散量）是主要支出项，降水量与蒸发量的比例，决定了土壤水分状况及其变化规律。在降水量超过蒸发量的地区，土壤中的盐份被淋洗而呈酸性反应，pH值一般都在6.0以下，这类地区水稻是优势作物；在降水量小于蒸发量的地区，土壤一般呈碱性反应，在海拔低、地下水位高的平原易形成土壤盐渍化，pH值一般都在7.5以上，旱作物为优势作物。

空气——是作物赖以生存的重要因素和物质来源，其组成物质有干洁空气、水汽和尘埃等杂质，其中农业气象学所着重研究的CO₂成分对农业自然条件的变化和产量形成至关重要。

空气中的CO₂在正常情况下为320ppm，即每立升空气含0.6毫克，它是作物光合作用形成有机物质的来源。空气中CO₂浓度的增长，有利于C₃作物光合效率的提高，CO₂对波长13—17微米的波谱区间的红外辐射有强烈的吸收作用，产生“温室效应”，增加大气温度，可能引起气候变异和作物种植界限的变更。

上面我们只概要的谈谈光、热、水、气诸要素与作物生育的关系，实际上，一个地区的气象条件总是以气候或天气条件综合的影响作物的生长发育。气候泛指某一地区气象条件的多年平均状况，天气则指气象要素值（或天气现象）在一较短时段内的状况，气候、天气条件和作物的相互关系各有其侧重面，气候条件的综合影响表现在作物分布的地带性和种植制度的区域性。如世界各地农田的分布与年降雨量有密切关系，凡年降雨量小于250毫米地区，如无灌溉条件，几乎就没有农田分布，一般认为年降雨量300—400毫米是农牧业过渡地带。全世界90%以上的水稻都集中在东亚和东南亚“水热同季”的季风区域内，83%的小麦分布在年降雨量500—1000毫米地带内。种植制度的地域性亦严格地受气候条件的制约，如我国黄河流域无霜期200—250天，年降雨量500—1000毫米，种植制度是一年两熟或两年三熟，以旱作物为

主。到长江流域无霜期为230—300天，年降雨量1000—1500毫米，农作物是双季连作稻，是一年两熟或三熟共存地区。

天气条件对农作物影响主要表现为农业气象灾害。当某年气象条件异常，降水量如显著偏离平均值则会造成旱、涝灾害。在作物生长期气温大幅度降低则会造成冷害或冻害。这些灾害将给作物产量带来严重影响。如1971、1976、1980三次冷害给日本水稻生产造成重大损失，仅1980年作物受害面积达206.8万公顷。又如我国河南省在干热风危害的年份损失小麦可达10—15亿千克。

气象条件与作物的关系不仅局限于生育状况和产量上，目前，作物产品品质与气象的研究，已越来越引起人们的重视，从果实的色、香、味，到蛋白质、淀粉、含油率、糖分、酸度以及特种经济作物、药用作物的有效成分含量等都与气象条件有密切关系，优质小麦、优质大米、优质水果等基地的建设和开发都对农业气象提出了新的要求，作物品质气象的定性定量、现象与机理等研究，给作物气象学开辟了一个崭新的领域。

另外，随着人们对作物生产与气象关系的认识的不断深入，作物气象模式研究也在不断地发展，特别是从五十年代以来，由于数理统计学的发展，电子计算机和人工控制气象条件的科学实验设施出现，以及植物生理、生化和微气象学的发展，大大地推动了作物气象模式的研究和应用，尤其是六十年代以来，开展了各种作物群体生长的理论模拟研究，建立了土壤——植物——大气系统模式。

第二节 作物气象模式

作物气象模式一般可以划分为三类，即经验统计模式、理论统计模式和理论（动力）模式。前者以统计学理论为基础，对多年观测资料进行统计分析；后两种以能量平衡和物质输送过程的

机制为基础，对作物的生长发育和产量形成的全过程进行数值分析和模拟。

一、经验统计模式

自农业气象学诞生之日起，统计学的方法即在学科中得以应用。V.M.Обухов 和 R. Fisher 的工作具有奠基的性质。Обухов 首先广泛地应用多元回归的方法分析气象条件对作物产量的影响，其线性回归模式如下：

$$\hat{y} = a + \sum_{i=1}^n B_i \cdot X_i \quad (1)$$

式中， \hat{y} 为估测产量， a 为常数项， B_i ($i=1$ 到 n) 为系数， X_i 为 n 个影响产量的因子，这些因子包括气象因子，某些作物状况（如高度、密度、植物量、叶面积等），以及农业经营管理措施等。

R. Fisher 提出积分回归方法原是研究气象条件对小麦产量的影响。所谓积分回归分析即利用积分的方法进行回归分析。多元积分回归的模式为：

$$\hat{y} = C + \sum_{j=1}^p \int_0^{\tau} a_j(t) X_j(t) dt \quad (2)$$

(2) 式中反映了多个气象要素 X_j ($j=1, 2, 3, \dots, p$) 在不同生物学时段中对产量 y 的影响， $X_j(t)$ 为第 j 个气象要素在 t 的时刻的取值， $a_j(t)$ 为 $X_j(t)$ 对 y 的影响系数，它实质上是积分回归的偏回归系数。根据 $a_j(t)$ 随时间的变化，可以分析出不同的生物学时段第 j 个气象要素对 y 的影响程度， $a_j(t)$ 时间变化曲线上峰谷的分布实际对应了作物对第 j 个气象要素的敏感期。

此外，还有些在作物气象中常用的模式亦具有经验统计性

质，如反应植物增长过程的生长曲线，其数学模式为：

$$y(x) = \frac{C}{1 + e^{a-bx}} \quad (3)$$

$y(x)$ 是生长曲线的函数， x 为变量， a 、 b 、 c 、为系数。

植物的光合强度 (A) 与光照强度 (I) 的门司·佐伯公式：

$$A = \frac{bI}{1+aI} \quad (a, b \text{ 为系数}) \quad (4)$$

二、理论统计模式

以上所述的经验统计方法在农业气象发展过程中起过重要的作用，解决了一些重要的实际课题，但确实有其局限性。因为我们对外界环境条件影响作物产量形成过程的理论和知识越来越丰富，但是在回归公式中只考虑其中的一少部分，并常受到试验资料样本小和所选用因子独立性不强等限制，因此从七十年代以来 Baier、Дмитренко 和 Константинов 等提出一些新的方法。这类方法的共同倾向是在回归公式中更充分地考虑了影响作物生育和产量形成过程的物理或生理上的机制和信息，这类模式称为理论统计模式，实质上它是一种半理论半经验模式。例如，Baier 提出的作物产量形成的阶乘模式为

$$y = \sum_{t=0}^m V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \quad (5)$$

(5) 式中 y 代表最终产量或任何发育阶段 (t) 经济产量的依变量。 t 值可用 Robertson 提出的生物气象时间尺度来确定，如播种时 $t=0$ ，出苗 $t=1$ ，拔节 $t=2$ 等等，一直到 $t=m$ 。 V_1 、 V_2 和 V_3 为选定的输入变量 X_j 的非线性函数，Baier 用抛物线函数拟合，即

$$V_j = a_0 + a_1 x_j + a_2 x_j^2 \quad (6)$$

函数 V_j 可以是最高或最低气温、土壤湿度、实际蒸散与潜在蒸散之比，或地球总辐射的函数。

Дмитренко 研究的模式是用来估算冬小麦、玉米、马铃薯等作物的产量，这种产量和影响因子间之关系可用下式表示：

$$\hat{y} = y_j(1 - P) \cdot f(K) \cdot S(T, R) \cdot h(I) \quad (7)$$

(7) 式 \hat{y} 为估算产量， y_j 为第 j 年统计的最高产量， P 为植物密度， $f(K)$ 为分蘖函数， $S(T, R)$ 为生产率指数， $h(I)$ 是一个由各种收获面积对播种面积之比组成的产量水平指数。

这类理论统计模式还有：

1. 作物群众的光—光合模式：

$$A = \frac{b}{ak} \ln\left(\frac{1 + aI_0}{1 + aI_0 e^{-kF}}\right) \quad (8)$$

(8) 式中 A 为群体光合强度， I_0 为自然光照强度， F 为叶面积系数， K 为消光系数， a 、 b 为统计参数。

2. 水稻空壳率与光、温关系模式：

$$P_s = P_0 e^{-as} + bt + c \quad (9)$$

s 为处理期间每天实际平均日照时数， P_s 为在 s 小时日照条件下的空壳率， t 为处理期间的平均温度， P_0 为完全遮光下的最大空壳率， a 、 b 、 c 为统计参数。

3. 冬小麦越冬死苗率 (y) 与临界低温持续时间 (t) 的关系：

$$y = A_0 + Ce^{kt} \quad (10)$$

A_0 为临界低温下的死苗率， C 、 k 为统计参数。

4. 以幂函数表达的温度对水稻发育速度影响的非线性模式：

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{K} (T - B)^{1+P} (M - T)^{1+Q} \quad (11)$$

(11) 式中 n 是完成发育期天数, $\frac{1}{n}$ 是发育速度, B 是生物学下限温度, M 是生物学上限温度, K 、 P 、 Q 为统计参数。

如果认为作物发育速度最快时的温度为发育的最适宜温度, 即对 (11) 式求导数:

$$\left(\frac{1}{n}\right)' = K^{-1}(T-B)^P(M-T)^Q[(1+P)(M-T) - (1+Q)(T-B)]$$

显然 $\frac{1}{n}$ 有最大值, 由此得出作物发育最适温度 T_0 的理论统计模式为:

$$T_0 = \frac{(1+P)M + (1+Q)B}{2+P+Q} \quad (12)$$

农业气象上的当量积温概念, 就是:

$$\Sigma\theta = n_0 T_0 \quad (13)$$

$\Sigma\theta$ 为当量积温, n_0 为温度 T_0 时完成某发育期所需最少的间隔日数值。

三、理论(动力)模式

近10—15年来, 土壤-植物-大气系统的模拟模式研究迅速发展, 作物最重要的生命过程—光合作用、呼吸作用、水分消耗和营养物质运输等方面已建成模式, 决定系统的生产力水平的能量和物质转化过程的研究取得了很大的进步, 这些新知识的综合, 形成了作物的理论模式, 或称动力(或动态)模拟模式。这类模式显然是很错综烦杂的。以作物体温变化为例, 太阳辐射使植物体温(主要是叶温)上升和土壤蒸发的加速, 叶温上升(在一定限度内)可加强光合作用和呼吸作用, 也增强蒸腾, 这一反馈作用使叶片冷却免于温度进一步升高。蒸腾量的变化使叶子水

势改变，影响气孔控制的机制；气孔阻力的变化又必然影响 CO_2 流向叶绿体的速度及光合作用。并且，叶温升高的影响不只限于短暂的时刻，通过惰性要素（叶面积、根系范围和土壤湿度）也影响作物的未来状态。

理论模式的建立首先要模拟作物生长状态建立几何模型，现以黑岩澄雄、李赋镛等提出的作物群体光合量模式为例，予以说明。

假设群体纯由叶片所组成，全部叶片法线均与垂线成相同角度 α ，绕垂线成随机分布，并且群体叶面积与分布密度仅是垂直深度的的函数。由此可作一直角坐标系（见图1—1）。

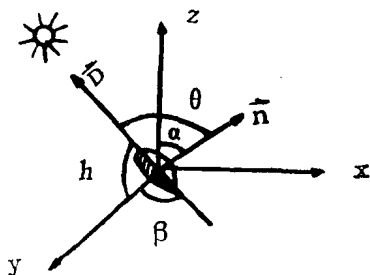


图1—1 作物群体光合模型坐标系图

其中 z 轴垂直于地面，也是叶片角度分布的对称轴。日光由 (y, z) 平面射向叶片的 O 点，太阳高度为 h ，叶片法线 \vec{n} 的方向可由 α （法线方向与垂线的夹角）、 β （太阳方位角）两个角度表示，令 \vec{D} 代表由 O 指向太阳方向的单位矢量，则 \vec{n} 、 \vec{D} 两个矢量的夹角为 θ ，并且：

$$\cos\theta = \cos\alpha \sinh + \sin\alpha \cosh\cos\beta$$

由此可以计算出单位面积（ 1米^2 ）上的最大受光叶面积 S'

$$S' = \begin{cases} \frac{1}{\cos\alpha} & \text{当 } h \geq \alpha \\ \frac{\pi \operatorname{tgh}}{2 \sin\alpha [\eta(\bar{\beta}) + \frac{\pi}{2} \cos\bar{\beta}]} & \text{当 } h < \alpha \end{cases} \quad (14)$$

(14) 式中 η 函数定义为:

$$\eta(\beta) = \sin\beta - \beta \cos\beta$$

$\bar{\beta}$ 是 $\operatorname{coc}\theta = 0$ 时的 β 角, 其值为:

$$\bar{\beta} = \cos^{-1} \left(-\frac{\operatorname{tgh}}{\operatorname{tga}} \right)$$

据上述模型, 可导出受群体透光率 (T) 的普遍公式:

$$T = \operatorname{EXP} \left(-\frac{|\cos\theta|}{\sinh} \int_0^z f(z) dz \right) \quad (15)$$

z 是从群体表面到作物丛内的垂直深度, $f(z)$ 是群体的叶面积密度。

在此基础上可以计算出作物群体单位面积上的最大光合量 (P')。当 $h < \alpha$ 时:

$$P' = KE_0 \sinh \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\eta_C + \eta_{C'} + \pi \cos\beta_{C'}}{\bar{\eta} + \frac{\pi}{2} \cos\bar{\beta}} \right] \quad (16)$$

(16) 式中, E_0 为太阳入射光的垂直光照强度, K 为常数, C 函数的形式为:

$$C = \frac{1}{2\pi \cos\alpha \sinh} \quad (16 \cdot 1)$$

$\beta_{C'}$ 定义为

$$\beta_{C'} = \begin{cases} \cos^{-1}\zeta & \text{当 } \zeta = \frac{-r - \cos\alpha \sinh}{\sin\alpha \cosh} \geq -1 \\ \pi & \text{当 } \zeta < -1 \end{cases} \quad (16 \cdot 2)$$