

作物微气象学：模拟研究

〔荷〕 J. 高德力安 著

科学出版社

作物微气象学：模拟研究

〔荷〕J. 高德力安 著

王正非 孙纪政 译
朱廷曜 崔启武

科学出版社

1985

内 容 简 介

本书是最新出版的农业气象模拟专著。使用国际上最通用的语言 CSMP, 编写成计算机程序, 其中包括: 植物冠层中辐射衰减、叶的透射和反射, 微天气模拟等。在程序设计方面, 着重讨论谱系方法、求解技术和劲度系统。书中还详细地阐述太阳直接辐射和漫射辐射在植物冠层中的分配, 能量和物质平衡, 植物冠层内及其上的湍流和风。最后, 应用上述的理论推导进行了特例研究, 对能通量日变程、净 CO_2 同化、露形成以及灵敏度分析等做了详细的叙述, 而且对观测值和模拟值做了对照。

本书适用于农、林、气象、生态和植物群落方面的工作者、教师、研究生和大学生, 以及其它领域内, 对模拟技术有兴趣的读者阅读和参考。

J. Goudriaan

CROP MICROMETEOROLOGY: A SIMULATION STUDY

Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1977

作物微气象学: 模拟研究

〔荷〕J. 高德力安 著

王正非 孙纪政
朱廷曜 崔启武 译

责任编辑 郑秀灵

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1985 年 9 月第 一 版 开本: 787×1092 1/32
1985 年 9 月第一次印刷 印张: 7 13/16
印数: 0001—2,200 字数: 177,000

统一书号: 13031 · 2994

本社书号: 4042 · 13—15

定价: 1.85 元

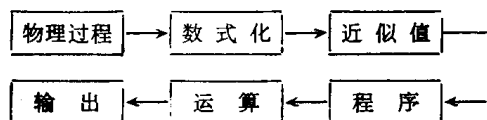
译 者 的 话

本书是荷兰瓦格宁根 (Wageningen) 农业大学理论产量生态学部研究员 J. 高德力安的论文, 出版于 1977 年, 但至今国内外的微气象工作者仍给予较高的评价。因此, 将它译出, 供读者参考。

本书的主要特点是比较系统地说明了微气象学的数学模拟方法。第二章到第四章对于作物微气象场的环境因子、辐射、能量与质量、湍流与风以及它们和作物冠层与群株结构之间的关系做了详细的数学推导和论证。以这些数学式为子模式, 使用 CSMP 语言编成源程序, 输入计算机运算。书中使用的多是短链程序, 并且 CSMP 语言是国际上的常用语言, 它同我国通用的 FORTRAN 语言相近似, 这样就易于移植使用。

在第六章中, 列举一些个例分析, 从而验证了前几章由自然现象分析出来的数值模式的正确性。

一般的数学模拟的顺序是:



作者在第五章里采用最简单的例子说明编程序的要领, 这就使接触计算机机会不多的读者容易领会。

本书虽然是作物微气象学的模拟研究, 对于森林气象学、草原气象学以及生态系统的各方面的数学模拟也有一定的参考价值。

本书译、校人员分工为: 第一章: 王正非译, 孙纪政校;

第二章：崔启武、孙纪政译，王正非校；第三章：孙纪政、王正非译；第四章：朱廷曜译，孙纪政、王正非校，第五章：王正非译，孙纪政校；第六章：孙纪政译，王正非校；附录：孙纪政译。全书承国家气象局农业气象研究所王馥棠同志审校。

限于水平，译文一定存在不少缺点和错误，由衷希望读者批评指正。

• • •

目 录

第一章 导言	(1)
§ 1.1 问题的确定	(1)
§ 1.2 本书的梗概	(2)
§ 1.3 符号和单位	(3)
第二章 植物冠层中的辐射	(5)
§ 2.1 引言	(5)
§ 2.2 基本要素	(6)
2.2.1 几何结构 2.2.2 入射辐射 2.2.3 光的性质	
§ 2.3 基本模式	(12)
2.3.1 水平叶层 2.3.2 非水平叶冠层的角分布 2.3.3 简化公式	
2.3.4 鉴定 2.3.5 一种重要的互反作用 2.3.6 热辐射	
§ 2.4 模式的延伸	(39)
2.4.1 标准阴天的辐射分布源 2.4.2 反射和透射不相等的叶子 2.4.3 叶状况的空间相互影响 2.4.4 成行植物	
第二章使用的符号表	(64)
第三章 能量和质量平衡	(70)
§ 3.1 引言	(70)
§ 3.2 单叶	(70)
§ 3.3 土壤表面	(76)
§ 3.4 冠层	(79)
3.4.1 引言 3.4.2 叶面积指数小于 0.2 3.4.3 叶面积指数大于 0.2 3.4.4 水分状况	
§ 3.5 冠层内空气	(85)
第三章使用的符号表	(86)
第四章 湍流和风	(90)
§ 4.1 引言	(90)
§ 4.2 冠层上的交换	(91)

4.2.1 中性条件	4.2.2 非中性条件	
§ 4.3 冠层内交换		(103)
4.3.1 中性条件	4.3.2 非中性条件	
§ 4.4 推导 Z_0 和 d 的基本方法		(110)
§ 4.5 时间和空间变率		(113)
第四章使用的符号表		(117)
第五章 程序设计		(119)
§ 5.1 引言		(119)
§ 5.2 时间和空间的边界		(119)
5.2.1 初值	5.2.2 空间边界	5.2.3 天气测值的转换
5.2.4 可用辐射资料的类型		
§ 5.3 谱系方法		(124)
§ 5.4 求解技术		(125)
§ 5.5 劲度系统		(128)
§ 5.6 程序和缩写表		(136)
第六章 结果		(174)
§ 6.1 引言		(174)
§ 6.2 特例研究		(174)
6.2.1 说明	6.2.2 能通量的日变程	6.2.3 温度和湿度
6.2.4 净 CO_2 同化	6.2.5 露	
§ 6.3 灵敏度分析		(184)
6.3.1 引言	6.3.2 天气数据输入	6.3.3 作物冠层和土壤的分层
6.3.4 参考高度	6.3.5 植物特性	6.3.6 土壤性质
6.3.7 湍流交换		
§ 6.4 实验鉴定		(207)
6.4.1 引言	6.4.2 实验条件	6.4.3 观测值和模拟输出值的比较
6.4.4 讨论		
总结		(230)
参考文献		(235)
附录 A		(240)
附录 B		(242)

第一章 导 言

§ 1.1 问题的确定

生产生态学主要是研究内部及外部因子，如何影响作物和牧草的生长、发育以及它们的病虫害等的一门科学。譬如，在半干旱条件下，草原的初级生产力（van Keulen, 1975）或果树螨类红蜘蛛的群体增长（Rabbing, 1976）就是一些例子。对于这些问题的研究范围的选择和确定，当然还取决于社会经济因素。几乎在每项这种应用研究中，都要涉及到不同的学科，如土壤学、物理学、气象学、植物生理学、植物病理学和昆虫学。至于这些学科在整个研究中的重要性以及它们应被作多大程度的考虑必须依照所研究问题的详细情况来回答。本专著是微气象学领域中这样一种研究的成果。由于在微气象学中包括有许多因子，而部分地还相互影响，因此，只能借助于模拟技术，才能成功地对它们的综合影响，作一定量鉴定。

在微气象学中，比起气象学来，更需要把植物或土壤对它们的环境的反馈作用考虑进去。例如，植物通过遮荫、释放水汽以及减弱风速等来改变环境。植物本身的特性在改变环境中也起作用。这些都考虑为已知参数，尽管事实上它们部分地受到过去气象条件的影响。

然而，因为这种研究局限于在几天时间尺度内，所以未考虑微天气对植物形态的影响。但对一些短期影响，例如，因蒸腾而造成的植物水分应力则作了考虑。这里不仅研究了对于

作物生长、发育起直接作用的各重要微气象因子,而且对那些于病虫害发展起作用的因子,例如叶部潮湿持续时间,也作了考虑。由于研究的时期较短,故使用微天气这一术语要比微气候合适。典型的微气候影响,例如山丘坡向,在本研究中,未加考虑。

本专著的目的是为了说明微天气是植物和土壤性质以及冠层以上某一高度天气条件的函数。这些输入数据的地点选定,就严格地限制了这项研究的作用域,因为尚有一个重要的缺陷留待以后解决:即所研究的作物面上某高度的天气条件和标准气象台(站)的记录的天气条件之间的关系。然而,这种研究的结果意味着大大简化研究作物和牧草的生长、发育以及它们的病虫害所需要的输入数据。

§ 1.2 本书的梗概

用大量的微气象学出版物来说明这个研究项目的复杂性。这些研究大部分是实验性的,它们同时积累了大量的资料。有不少文献涉及微气象系统的各基本要素,如热量和质量的交换、辐射、植物生态生理学。还有一种可以鉴定它们的综合效应的模拟技术,这是一种对现有知识进行定量综合的好方法。此外,在模拟程序中,人们必须清楚地说明和模拟有关的每个子模式是如何反映实际情况的,这样就提供了适于讨论和进一步改进的基础,如本研究中所表示的那样。

在第二、三、四章中,提出并讨论了本书中使用的各个子模式。第二章叙述了作物的辐射模式的建立。这个模式同时给出了大尺度(作物的反射率及透射率)和小尺度(叶面吸收强度的分布)的结果。Lemeur 和 Blad (1974)的两段话:即“把各基本模式综合成可以运算的工作模式是非常必要的”并

且,“首先应从理论模式计算出经验常数,并通过实验来检验相应的公式”就确切地说明了模拟技术的目的所在。在第三章中将叶面及土壤表面的能量和质量平衡模式化,并进行了讨论。综合第二章和第三章,可满足 Lemeur 和 Blad (1974) 的另一要求:即“必须把辐射模式和蒸腾、光合现象联系起来”。在第四章中把风和湍流作为植物冠层上和冠层内的有关现象来叙述。

各子模式中所需要的参数值几乎都是来源于现有的文献。但对模式的结构,本文根据既适用又精确简便的原则,作了专门的研制。

第五章讨论了有关微天气模拟程序中综合各子模式所造成的某些程序编制的困难。关于建立系统模式的某些一般性的考虑事项,也在这一章内作了介绍。

模式的两个应用结果写在第六章中。首先对典型情况的模式总体特性及灵敏度作了分析;然后,再以实验资料鉴定了其它情况下的模式特性。

每章都由引言开始,概述其范围。在第七章中,总结了各章的结果,它也可当作全书的总结。通过阅读这些引言和总结,可以很容易地对本书获得一个总的印象。

§ 1.3 符号和单位

符号和单位均列在第二、三和四章的后面。它们都是国际系统(SI)的符号和单位,只有几个例外。使用旧系统的有水汽压单位:毫巴,植物水分应力单位:巴以及 CO_2 浓度单位:百万分之一容量,简单用 vpm 表示。

能量产生的速度[焦耳·秒⁻¹(Js⁻¹)]用“流”(flow)表示,能量通过单位表面的速度[焦耳·米⁻²·秒⁻¹](Jm⁻²s⁻¹)

用“通量”(flux)表示,以代替标准的但有些不实用的术语:“通量”和“通量密度”。符号差不多与 Monteith (1973) 所用的相同。符号“ s ”是例外,用它表示饱和水汽压曲线的斜率,以代替符号“ Δ ”。三个字母组成的 *LAI* 代表一个变量——叶面积指数。变量的数量很多使必须在第二、三和四章分别列出符号表。计算机符号也在这些表上,可以用于编制程序。此外,还给出了变量在文中首次出现的方程式号数,变量只出现一、二次时则省略之。

第二章 植物冠层中的辐射

§ 2.1 引 言

在植物生长模拟模式中，冠层叶子吸收的辐射是控制光合作用和蒸腾的主要因子。近年来在这方面发表了几篇材料。Lemeur 和 Blad (1974) 对光模式作了一个很好的评述。故在此就可以对过去的工作作一个简短的概述。

1953 年，Monsi 和 Saeki 曾导出冠层中辐射的指数衰减概念。1959 年，de Wit 第一次用分析的方法计算了光的分布，但到 1965 年才使用完整的数值方法。Anderson (1966) Cowan (1968), Lemeur (1971) 以及 Ross 和 Nilson (1966) 等人的工作对此有某些扩展。他们使用简单的分析方法，但有时还采用计算机程序。其中 Cowan 的分析方法是唯一适用于具有水平叶冠层的方法，而 Ross 和 Nilson 的方法是一种更普遍的，但也是更复杂和更麻烦一些的方法。

曾经试图设计出能相当普遍地符合实际状况的模式，将其结果公式化又相当简单，无需太费事就可应用。

首先在 2.2 节中提出了这种模式的基本要素。接着在 2.3.1 节中分析了水平叶冠层的情况，在 2.3.2 节中利用由 de Wit 的数值分析方法延伸的多层分割法对非水平叶角的分布的更一般情况进行了讨论。2.3.3 节中总结了这个数值模式的结果，主要是归纳水平叶层的早期结果。在 2.3.4 节中用实际资料（大部分取自文献）对计算结果进行了验证，这种模式也应用于探讨热辐射。在 2.4 节中给出了一些模式的延伸式。

第一个就是具有很高散射系数的单体元情况；第二个是取消了叶面反射系数必须等于透射系数这样一个限制条件。随后，讨论了非随机分布叶子的状况，应特别注意成行栽培植株里的辐射场。这在 2.44 节中进行了论述。

§ 2.2 基本要素

2.2.1 几何结构

假设冠层在水平面上是均一的，从而不考虑水平方向的叶子丛集问题。叶面积密度随高度而定，单位为米²叶面·米⁻³空气，一层林冠的叶子数目等于叶面积密度和该层空间容积的乘积，再被单位叶子面积除。一个单位容积中玉米叶的实际数目可由泊松分布来描述 (Sinclair & Lemon, 1974)，但在该模式中仅考虑了叶面积的期望值和辐射通量。如果冠层在水平方向的扩展足够大时，这是可以的。这样，下层的叶子与叶子之间没有相关性，而把水平层看成是连续性水平层。每一层对应有一个每单位地面的叶面积值 L_z 。把 L_z 定得如此小使得这样的层中叶子的相互遮阴可以忽略不计。为此， L_z 值为 0.1 就足够小了。总的层数等于叶面积指数 LAI 被 L_z 除。

叶子具有由叶角分布给定的各种倾角，它是高度的函数，可按每 10° 分一组区分为 9 组。假设不计叶子的方位角这一参数，则倾角为 λ 的叶子在入射光倾角为 β 方向上的平均投影可以计算出来。de Wit (1965) 给出了入射角为 θ 的正弦公式：

$$\sin \theta = \sin \beta \cos \lambda + \cos \beta \sin \lambda \sin \alpha \quad (2.1)$$

式中 α 是叶面法线与入射光之间的方位差。

叶子的平均投影可由 α 平均而获得：

$$O(\beta, \lambda) = \frac{\int_0^{\pi/2} \sin \theta d\alpha}{\int_0^{\pi/2} d\alpha} \quad (2.2)$$

由于叶子上下两面对光的拦截具有相同的效果，因而 $\sin \theta$ 的绝对值必须以积分求出，则：

$$O(\beta, \lambda) = \sin \beta \cos \lambda \quad \lambda \leq \beta \quad (2.3a)$$

$$O(\beta, \lambda) = \frac{2}{\pi} \left\{ \sin \beta \cos \lambda \arcsin \left(\frac{\tan \beta}{\tan \lambda} \right) + (\sin^2 \lambda - \sin^2 \beta)^{0.5} \right\} \quad \lambda > \beta \quad (2.3b)$$

全部叶子的平均投影可由下式给出：

$$\bar{O}(\beta) = \sum_{\lambda=1}^9 F(\lambda) O(\beta, \lambda) \quad (2.4)$$

式中， $F(\lambda)$ 为叶子的倾角分布函数，所以

$$\sum_{\lambda=1}^9 F(\lambda) = 1$$

某些特殊的叶角分布，为：

水平，用

$$O(\beta, \lambda) = \sin \beta \quad (2.5)$$

垂直，用

$$O(\beta, \lambda) = \frac{2}{\pi} \cos \beta \quad (2.6)$$

球形或各向同性

此时叶倾角的分布函数类同于一个球的球面元的分布，因而 $F(1-9)$ 可由下式给出：

$$F(1-9) = 0.015; 0.045; 0.074; 0.099; 0.124;$$

$$0.143; 0.158; 0.168; 0.174$$

这是通过计算 $\cos 0^\circ - \cos 10^\circ$ ， $\cos 10^\circ - \cos 20^\circ$ ，等等求得的。

采用各向同性这个词,是因为考虑到投影 $\bar{O}(\beta)$ 在所有方向上都相等,并等于 0.5,此值是半球的底面积与半球球面积之比。

2.3.4 节中给出了一个重要的简化计算 $\bar{O}(\beta)$ 的方法,是由 Ross (1975) 发展的。

冠层中每一高度的辐射可以分为向上的辐射通量和向下的辐射通量。它们按倾角 10 度的间距细分为四组,这样就概括了上半球和下半球的辐射通量。由于叶子没有方位角这一参数,所以不需要将辐射作方位分类,直接太阳辐射通量单独予以处理,它的消光计算可以采用计算黑叶冠层辐射消光的同一公式。

2.2.2 入射辐射

入射辐射可分为四个光谱区。每一光谱区,其几何结构是已知的,由于叶子没有方位参数,故它仅仅按倾角分布而分组,这样一来,对四个光谱区和九组倾角,则有 36 种入射辐射。好在可以大大地简化。

光谱区

首先将入射辐射分为热辐射(波长大于 3000 纳米)和短波辐射(波长小于 3000 纳米)。和天空热辐射以及太阳辐射中其它光谱区的热辐射相比较,可以看到直射太阳辐射对热辐射的贡献是微不足道的。原则上说,对热辐射或长波辐射的处理要比对短波辐射的处理更为复杂一些,因为叶子本身也有热辐射。因此,关于热辐射的模式化将在研究短波辐射(2.3.6节)之后再提出。净热辐射通量和入射太阳辐射之间无实际关系,所以必须分别测定之。表观天空温度最能表征热辐射通量。太阳辐射或总辐射可以大致分为三区:紫外区,可见光区和近红外区。在海平面高度上,紫外区(波长小于 400

毫微米)的辐射只占总太阳能量的 3%, 因而可以略去。这样一来, 太阳辐射的光谱组成可以用入射的可见光与近红外辐射的比例来表示。在晴天, 两者各占入射辐射的一半, 在阴天, 此比例约为 0.6:0.4, 可见光区占优势。

更详尽的数值可在 Smithsonian 的气象用表 (List, 1949) 和 Šul'gin (1973) 的文章中找到。

几何分布

测定的人射辐射必须分为直射和漫射。直射辐射有一个已知的太阳倾角。漫射光在 9 组叶倾角中的分布, 存在着两种假定任择其一。按照第一种假定, 天空有均一辐射率, 结果是各向同性向下辐射。设辐射率为 N , 从一个无限小的立体角 $d\omega$ 照射到水平面 (在光倾角为 β , 方位角为 α 时) 上分量为:

$$dS = N \sin \beta d\omega \quad (2.7)$$

立体角 $d\omega$ 由下式给出:

$$d\omega = \cos \beta d\beta d\alpha \quad (2.8)$$

所以 dS 能写为:

$$dS = N \sin \beta \cos \beta d\beta d\alpha \quad (2.9)$$

方位角 α 从 0 到 2π 积分, 就可从无限小的带 $d\beta$ 中得出一个倾角 β 的分布, 即

$$dS = 2\pi N \sin \beta \cos \beta d\beta \quad (2.10)$$

β 从 0 到 $\pi/2$ 积分, 得到 $S = \pi N$ (N 为常数), 如以 S_d 表示向下的漫射通量, 则

$$dS = 2S_d \sin \beta \cos \beta d\beta \quad (2.11)$$

按 10 度间距为带界进行带间积分, 可给出 dS/S 的积分分布表, 以 B_n 表示之:

$$B_n(1-9) = 0.030; 0.087; 0.133; 0.163; 0.174; \\ 0.163; 0.133; 0.087; 0.030$$

这称之为均一阴天(UOC)分布的情形。可将其用于阴天,晴天的漫射辐射计算和土壤表面的反射辐射计算。

另外一些研究者作出了另一种假设: 标准阴天(SOC)。根据由 Moon 和 Spenser (1942) 提出,随后被 Grace (1971) 证实的经验关系,标准阴天的辐射强度可由下式给出:

$$N = N_z(1 + 2 \sin \beta)/3 \quad (2.12)$$

在此公式中,辐射强度从水平面到天顶缓慢地增加到 3 倍。在 2.4.1 节中给出了此经验关系的理论根据。对公式(2.12)积分,得出:

$$S_d = 7\pi N_z/9 \quad (2.13)$$

所以

$$dS = \frac{6}{7} S_d(1 + 2 \sin \beta) \sin \beta \cos \beta d\beta \quad (2.14)$$

按 10 度间距为带界,进行 dS/S 的带间积分。得到 SOC 的分布表,以 B_i 表示之,为:

$$B_i(1-9) = 0.015; 0.057; 0.106; 0.150; 0.180; \\ 0.184; 0.160; 0.110; 0.038$$

2.3.2 节表 5 和表 6 中列出的数字表明在均一阴天和标准阴天下光的消减和反射差异很少。因此计算可以采用比较简单的 UOC 分布进行,除非另加说明。

表 1 晴天某些太阳高度角下可见光区的漫射辐射所占的比例

太 阳 倾 角	漫 射/总 辐 射
5	1.00
15	0.32
25	0.22
35	0.18
45	0.16
90	0.13