

土壤·植物·大气

相互作用原理及模拟研究

黄洪峰



气象出版社

土壤 植物 大气

黄洪峰

气象出版社

内容简介

本书从辐射传输、动量传输、水热传输的基本物理定律出发,系统地阐述发生在土壤表层、植物层及大气近地面层中的能量和物质交换过程及其相应的数学物理模型,同时根据已有实验研究,总结出一些可用的参数和简化模型。本书可供气象、农业、水文、土壤、植物等学科的读者参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

土壤·植物·大气相互作用原理及模拟研究/黄洪峰著.
北京:气象出版社,1997.6

ISBN7-5029-1987-2

I. 土… II. 黄… III. ①土壤—大气—相互作用模型—研究②植物—大气—相互作用模型—研究 IV. P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 13153 号

土壤·植物·大气相互作用原理及模拟研究

黄洪峰

责任编辑:周艺 张淑萍 终审:顾仁俭

封面设计:张文忻 责任技编:李昌明 责任校对:赵人任

* * * *

气象出版社 出版

(北京市海淀区白石桥路 46 号 邮编:100081)

北京市昌平兴华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * * *

开本:850×1168 1/32 印张:10 字数:250 千字

1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月第一次印刷

印数:1000 册 定价:16.00 元

ISBN 7-5029-1987-2/P·0861

序

植物能从土层中汲取多少水或养分,利用得怎样,这显然对合理灌溉、土地利用、科学种田以至防灾抗灾是十分重要的问题。现代的研究已把土壤—植物—大气作为一个物理上一体的动态系统,各种流动、过程联系在一起。以往土壤物理学家、植物生理学家和气象学家各自研究问题,连不少物理量也各有叫法,学科间交流、衔接都有困难。现在采用的原理多按能量、质量的传输过程来测定和分析土壤—植物—大气间的相互作用。各种流从高位能区流向低位能区,这十分复杂的系统中造成流动的势差各部位不一样,并随时间变化,既要建立方程组,还要通过试验得出可用的参数,以形成模式,研究过程很复杂。近三十年来,经过数量巨大的多方面实际问题的研究,取得长足的进步。

本书作者通过很大的努力,根据各国在该领域中最重要成就,分章阐述十种最主要的过程,列举基本方程,从实验中取得的可用参数和数学模型。读者会注意到,主要过程无不是土壤—植物—大气相互作用的体现。例如,湍流输送要看植被高度,根系吸水阻力要看土壤湿度(它又要看蒸散),实际蒸散要看植物特性等等。在研究一个具体问题时,往往要包含这十章中所述的多种过程。本书附录中,作者还提出一种较广泛的综合模式,这对已经提到日程上的气候问题中的陆面过程模式的建立可供参考。

本书的出版能为我国今后这个领域中理论研究的深入和实际应用的开发提供良好的帮助。

程纯枢

1994-11

* 程纯枢院士已于 1997 年初辞世,此为先生生前为本书所写的序。

前 言

本书研究的对象是土壤表层(土壤表面以下几米深度内)、大气近地面层(土壤表面以上几十米高度内)以及生长于其中的植物层所构成的土壤—植物—大气系统中的辐射传输、动量、热量和水分交换过程及对这些物理过程所进行的数学物理模拟。

在农业气象学和微气象学中,比起天气尺度的大气过程而言,更需要把植物或土壤对大气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其周围的大气环境。虽然在几天的天气尺度的大气模拟或预报中,可以忽略近地面层的作用即假定过程是绝热的,并忽略湍流通量效应。但越来越多的实验研究证明,对于月或季以上时间尺度的大气过程,大气边界层或近地面层的作用是决定性因素。这是因为边界层控制了输送给大气的主要热流量和大尺度运动动能的耗散。在当代大气环流模式中以及在全球气候变化预报研究中,迫切需要正确地反映大气近地面层的各种物理过程。例如,蒸发和降水之间的平衡、土壤水的贮量和径流,这些陆面过程与大气圈之间的相互作用对全球气候变化的影响至关重要。

对于土壤物理学而言,过去的研究通常是把大气近地面层作为土壤物理过程的上边界,土壤的物理特征是土壤表面以上某一高度天气条件的函数。但事实上,土壤过程和大气过程之间是相互反馈作用的。在大气环流模式中,这种相互反馈作用就更明显了。

早在1948年,Koner就提出应当把土壤、植物、大气作为

一个连续体来进行研究。随着对土壤物理学、植物生理学以及大气边界层物理学的研究不断取得新进展,特别是计算机技术的飞速发展,使得我们已有可能把各分支领域的研究成果统一起来,对土壤—植物—大气连续体中的一些相互联系的物理过程进行完整的数学物理描述。作者用了近五年时间,查阅了上千份文献,试图通过本书总结性地对土壤—植物—大气连续体中的水热交换和辐射传输过程进行物理分析,并在坚实的物理基础之上,对这些过程进行数学描述。同时提出一些经过检验认为较好的简化模型,供研究和业务应用。

全书分十章,第一章推导了植被冠层辐射传输方程,并讨论了方程在冠层辐射传输计算中的应用。第二章总结性地概括七十年代以来大气近地面层的主要研究成果。第三、四章导出冠层大气运动的完整方程组。第五、六章讨论土壤表层几米深度内的水热交换过程及土壤水热运动模型。第七章推导植物冠层内的水热交换方程,并提出和检验各种闭合模式。第八章讨论土壤—植物系统水流过程及植物体内的水流阻力。第九章总结冠层对降水截留的过程和模型。第十章简介性地讨论了流域产流和汇流模型以及土壤—植物—大气连续体数学物理模型在流域产汇流计算中的应用。附录还提出一个简化的土壤—植物—大气连续体模型,该模型可与大气环流模式连接,用于土壤—植被对大气环流影响的数植模拟,也可用于各种陆面过程的模拟研究。

作者

1997年3月

目 录

第一章 植被冠层内的辐射传输

1.1	植物冠层的几何结构	(1)
1.1.1	冠层高度、叶面积指数和叶面积密度	(2)
1.1.2	叶角分布函数、 X_L -指数和 G -函数	(4)
1.1.3	冠层元素的空间散布模型	(8)
1.2	叶片和冠层的光学性质	(12)
1.2.1	叶片的散射和吸收光谱	(12)
1.2.2	单张叶片散射相函数	(13)
1.2.3	冠层体积散射相函数	(16)
1.2.4	冠层面积散射相函数	(17)
1.3	冠层短波辐射传输	(20)
1.3.1	基本方程	(20)
1.3.2	边界条件	(23)
1.3.3	求解方法	(25)
1.3.4	简化模式	(36)
1.3.5	模式检验	(38)
1.4	冠层长波辐射输送	(39)
1.5	冠层内的净辐射通量密度	(43)

第二章 大气近地面层的湍流输送

2.1	近地面层湍流运动方程	(44)
2.1.1	大气运动的基本方程组	(44)
2.1.2	平均流方程	(46)

2.1.3	湍流通量方程·····	(48)
2.1.4	闭合假定·····	(51)
2.1.5	常通量层和方程的简化·····	(54)
2.1.6	近地面层的相似性·····	(58)
2.2	通量—廓线关系·····	(62)
2.3	湍流通量的计算方法·····	(64)
2.3.1	用梯度资料确定动量和热量通量·····	(64)
2.3.2	Penmen-Monteith 模式·····	(66)
2.3.2	Brown-Rosenburg 模式·····	(72)

第三章 植物叶片边界层

3.1	动量边界层·····	(73)
3.1.1	粘性·····	(73)
3.1.2	平板边界层·····	(75)
3.1.3	叶片阻力·····	(77)
3.2	热边界层·····	(80)
3.2.1	热流通量·····	(80)
3.2.2	强迫对流热输送·····	(81)
3.2.3	自然对流热输送·····	(86)
3.3	水汽边界层·····	(88)

第四章 植物冠层内的动量交换

4.1	冠层空气运动方程·····	(90)
4.1.1	动量守恒方程·····	(90)
4.1.2	二阶矩方程·····	(94)
4.2	冠层风场和湍流场的观测事实·····	(97)

4.2.1	平均风速廓线·····	(97)
4.2.2	切应力廓线·····	(97)
4.2.3	湍流强度·····	(98)
4.2.4	湍流能谱·····	(99)
4.3	冠层上方的通量—廓线关系·····	(101)
4.4	冠层流模型·····	(106)
4.4.1	一阶闭合模式·····	(106)
4.4.2	冠层—大气耦合的一阶闭合模式·····	(111)
4.4.3	二阶闭合模式·····	(116)
4.4.4	模式检验·····	(118)

第五章 土壤水运动

5.1	土壤含水量和土壤水势·····	(122)
5.1.1	土壤含水量·····	(122)
5.1.2	土壤水势·····	(123)
5.1.3	土壤水势与土壤含水量的关系·····	(126)
5.2	土壤水运动方程·····	(131)
5.3	土壤导水率·····	(133)
5.4	土壤包气带的水平衡·····	(135)
5.4.1	入渗·····	(136)
5.4.2	地表径流·····	(141)
5.4.3	入渗水的再分布·····	(145)
5.4.4	裸土表面蒸发·····	(147)
5.5	土壤水运动问题的数值解法·····	(155)
5.5.1	均质土壤一维非饱和问题·····	(156)
5.5.2	非均质土壤一维饱和—非饱和问题·····	(159)

第六章 土壤热传导及土壤水热运动

6.1	土壤热性质	(162)
6.2	土壤热传导方程	(165)
6.3	土壤水热运动	(166)
6.3.1	一个简化的土壤水热运动模型	(168)
6.3.2	土壤水热耦合运动的一般方程组	(171)

第七章 植物蒸腾及冠层内的水热交换

7.1	植物蒸腾	(179)
7.1.1	植物的蒸腾器官	(179)
7.1.2	单张叶片蒸腾	(183)
7.1.3	叶片对水汽扩散的阻力	(185)
7.1.4	环境因子对气孔阻力的影响	(188)
7.1.5	气孔传导率模型	(192)
7.1.6	冠层蒸腾量计算	(197)
7.2	植被冠层温湿场及水热输送的模拟	(204)
7.2.1	基本方程组	(204)
7.2.2	一阶闭合模式	(206)
7.2.3	二阶闭合模式	(214)

第八章 植物根部吸水及植物体内水流

8.1	植物细胞水势	(221)
8.1.1	植物细胞的结构	(221)
8.1.2	植物细胞水势	(222)
8.2	根的吸水区	(223)

8.2.1	根的外部形态	(223)
8.2.2	根的内部结构	(225)
8.2.3	根的吸水区	(227)
8.2.4	水在根内的流动路径	(228)
8.3	根围水运动模型	(229)
8.4	根内水运动模型	(231)
8.4.1	径向运动	(231)
8.4.2	纵向运动	(232)
8.4.3	水分在根内运动的总阻力	(233)
8.5	土壤—植物系统水流阻力	(234)
8.6	植物根系吸收土壤水分的数学模型	(239)

第九章 冠层截留水分

9.1	观测事实	(241)
9.1.1	冠层截留损失量	(241)
9.1.2	冠层最大贮藏能力	(244)
9.2	截留过程的数学模型	(247)
9.2.1	Rutter 模型	(248)
9.2.2	Gash 模型	(252)
9.2.3	模型检验	(254)

第十章 流域产流和汇流

10.1	产流	(255)
10.1.1	产流的概念和机制	(255)
10.1.2	流域产流模型	(259)
10.2	汇流	(271)

10.2.1 单位线方法 (272)

10.2.2 Saint-Venant 方程 (275)

10.3 流域降雨—径流模拟 (285)

附录：

土壤—植被—大气辐射、水分、热量、动量运移和贮存的模拟
模式..... (292)

第一章 植被冠层内的辐射传输

冠层辐射传输的基本问题是如何从植物群丛的结构和光学性质导出植物群丛中的辐射状况,以及根据冠层反射辐射的遥感观测反过来确定如叶片数量、生物量、森林资源等大面积生物统计特征。这正反两方面问题的重要应用价值使冠层辐射传输成为一项重要研究课题。

植被冠层辐射传输的一种相当成功的理论是建立在把植物群丛看作是混浊介质,其中叶片是吸收和散射辐射的要素。混浊介质辐射传输理论来源于天文物理学,60年代,前苏联学者将之修改后用于描述植物群丛辐射传输。Ross(1981)的著作对这一理论作过详细论述。

冠层辐射传输计算方法的复杂程度依赖于所应用的领域。对于光合作用计算,由于叶片对太阳光合有效辐射部分的散射小到可以忽略,因而计算方法变得很简单;但在遥感应用中,由于遥感对某些波段特别敏感,因而要求发展以求解完整传输方程精确解为目的的各种复杂方法。到目前为止,已经发展了几十种冠层辐射传输计算方法,Myneni 等人(1989)对此有过系统总结。

由于对单个叶片散射相函数的了解甚少,所以至今仍不可能精确地表达冠层体积或面积相函数。这也导致在求解冠层辐射传输方程时不可能获得高质量的结果。

1.1 植物冠层的几何结构

植被与大气之间相互作用的各种过程,如辐射传输过程、水热

交换过程以及对大气动量的吸收过程,都发生在植物体的表面上,从而受植物体表面的空间分布状况影响。

植物冠层的几何结构通常是指植物体表面的空间分布结构。植株在地面上的分布、叶片在植株空间的分布、叶片的大小和朝向都是决定冠层几何结构的因素。许多情况下,植物体表面积的绝大部分被叶子表面积占有,因此,冠层几何结构简单地就用叶子及其表面积的空间分布表征。但这种简化,例如对于落叶冠层,不总是确切的。

1.1.1 冠层高度、叶面积指数和叶面积密度

描述冠层几何结构最简单的特征量,是冠层几何高度 H 。 H 通常是指土壤表面至冠层最顶部的高度。其次是叶面积指数 LAI 。它是单位土地面积上的柱体内全部植物叶子面积(仅叶片的向上半面)之和。 LAI 是一个无因次量,以每平方米地表面积上的平方米叶面积表示。叶面积的空间分布用叶面积密度函数来表征。叶面积密度是单位空间容积内的叶面积,测量单位为每立方米空间内的平方米叶面积,即 米^{-1} 。叶面积指数与叶面积密度函数的关系可表示为:

$$LAI = \iiint_V f(x, y, z) dV \quad (1.1)$$

式中 V 是单位地表面积上、高度为 H 的柱体的体积。对于发达的植物群落,可近似认为叶子在水平方向上的分布是均匀的,这时叶面积密度函数仅与垂直坐标 z 有关,(1.1)式变为:

$$LAI = \int_0^H f(z) dz \quad (1.2)$$

式中 $f(z)$ 是叶面积密度的垂直分布函数。

自然植物群丛中, H 、 LAI 及 $f(z)$ 的变化是相当大的。为了对叶面积密度垂直分布进行比较,引进一个标准化的叶面积密度函

数 $A(\zeta)$:

$$A(\zeta) = \frac{Hf(z)}{LAI} \quad (1.3)$$

式中 $\zeta = \frac{z}{H}$ 为相对高度, 比值 $\frac{LAI}{H}$ 是整个冠层的平均叶面积密度。由(1.2)和(1.3)式可见, $A(\zeta)$ 满足:

$$\int_0^1 A(\zeta) d\zeta = 1 \quad (1.4)$$

当叶面积密度的垂直分布均匀一致时, $A(\zeta) = 1$ 。

有时, 为了方便还使用如下类型的标准化叶面积密度函数 $F(\zeta)$:

$$F(\zeta) = \frac{A(\zeta)}{L_{\max}} \quad (1.5)$$

式中 $L_{\max}$ 是 $A(\zeta)$ 的最大值。函数 $F(\zeta)$ 的取值范围是 $[0, 1]$ 。

(1.5)式从 $\zeta=0$ 至 1 积分, 并利用(1.4)式得:

$$L_{\max} = \frac{1}{\int_0^1 F(\zeta) d\zeta} \quad (1.6)$$

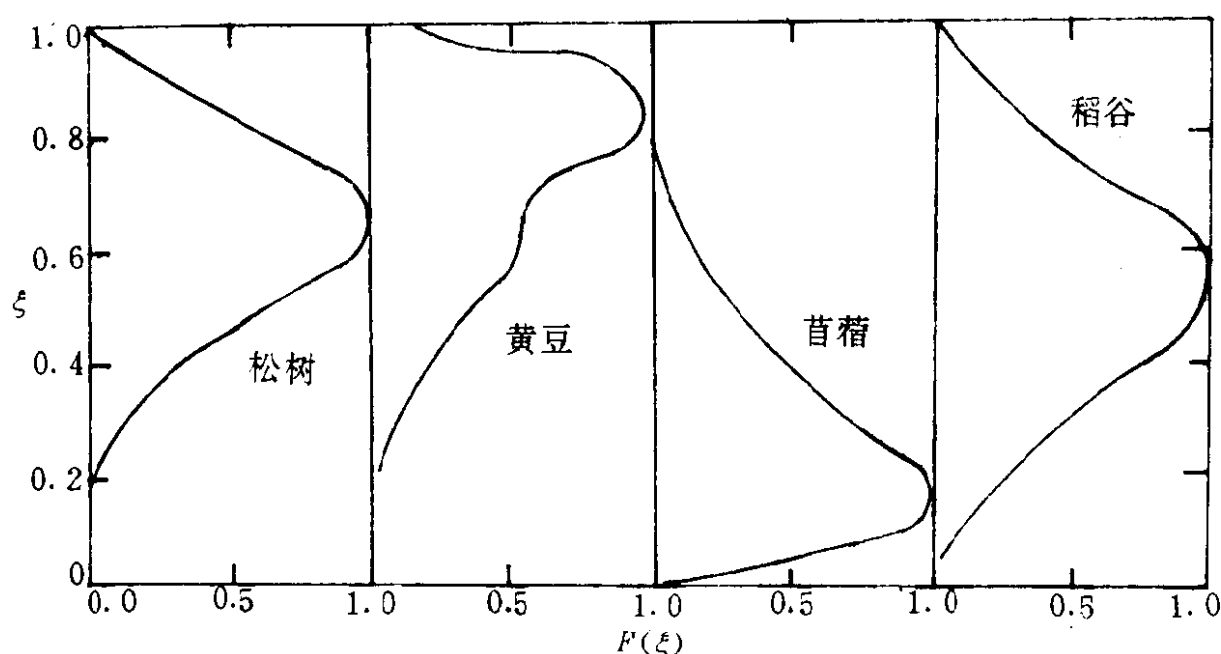


图 1.1 几种植物的叶面积密度函数 $F(\xi)$

图 1.1 给出包括森林、农作物和草等几种植物叶面积密度函数 $F(\zeta)$ 。可见,绝大部分植物的 $F(\zeta)$ 可用下面三角形分布函数逼近:

$$F(\zeta) = \begin{cases} a_1\zeta + a_2 & , \quad \zeta > \zeta_c \\ b_1\zeta + b_2 & , \quad \zeta < \zeta_c \end{cases} \quad (1.7)$$

式中 ζ_c 是 $L_{\max}$ 所在高度, a_1 、 a_2 、 b_1 和 b_2 是系数。

1.1.2 叶角分布函数、 X_L -指数和 G -函数

阳光在植物冠层内的穿透与叶子朝向有密切关系,叶子朝向用叶子的倾角和方位角表征。叶子向上半面某一点上的法线方向与 Z 轴(Z 轴垂直于水平面指向天空)的交角,称为叶子在该点的倾角,法线在水平面上的投影与正北方向的交角称为叶子在该点的方位角(顺时针方向为正)。同一叶子的不同部位,其倾角和方位角可能有很大差异。

为表示叶子朝向的空间分布,引入叶角分布函数 $g(\Omega_L)$ 。它是指法向为 Ω_L 方向的单位立体角内的叶面积占全部叶面积的比例。数学上, $g(\Omega_L)$ 定义为满足下式:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} g(\Omega_L) d\Omega_L = 1$$

或

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi_L \int_0^{\frac{\pi}{2}} g(\theta_L, \varphi_L) \sin\theta_L d\theta_L = 1 \quad (1.8)$$

式中 $\Omega_L = \{\theta_L, \varphi_L; \theta_L \in (0, \frac{\pi}{2}), \varphi_L \in (0, 2\pi)\}$ 。按定义, $g(\Omega_L)$ 可由下述直接方法测量:

首先将叶面倾角 θ_L 和方位角 φ_L 分别用一定的角度进行分割。对一般冠层而言, θ_L 宜用 10° 或 15° 的角度分割, φ_L 宜用 30° 或 45° 的角度分割。现用 $15^\circ (= \frac{\pi}{12})$ 的角度把 θ_L 分成六份,即:

$0 \sim 15^\circ (j=1), 15^\circ \sim 30^\circ (j=2), \dots, 75^\circ \sim 90^\circ (j=6)$ 。

用 $45^\circ (= \frac{\pi}{4})$ 的角度把 φ_L 分成 8 份, 即:

$0 \sim 45^\circ (k=1), 45^\circ \sim 90^\circ (k=2), \dots, 315^\circ \sim 360^\circ (k=8)$ 。

这样 $(\theta_L: 0, 90) \times (\varphi_L: 0, 360)$ 的半天球被分成 $6 \times 8 = 48$ 块。第 jk 块的立体角大小为:

$$\begin{aligned} \Omega_{jk} &= \int_{\frac{\pi}{4}(k-1)}^{\frac{\pi}{4}k} d\varphi \int_{\frac{\pi}{12}(j-1)}^{\frac{\pi}{12}j} \sin\theta d\theta \\ &= \frac{\pi}{4} \left[\cos \frac{\pi}{12}(j-1) - \cos \frac{\pi}{12}j \right] \end{aligned} \quad (1.9)$$

设法线位于 Ω_{jk} 内的叶子的面积之和为 L_{jk} , 全部叶子的面积为 L , 令 $g_{jk} = \frac{L_{jk}}{L}$, 则叶角分布函数可由下式计算:

$$g(\theta_L, \varphi_L) = \frac{g_{jk}}{\Omega_{jk}} \quad (1.10)$$

其中 $\theta_L \in \left[\frac{\pi}{12}(j-1), \frac{\pi}{12}j \right], \varphi_L \in \left[\frac{\pi}{4}(k-1), \frac{\pi}{4}k \right]$ 。

因此, 求分布函数 $g(\theta_L, \varphi_L)$ 就归结到求 g_{jk} , 即若能求出有关倾角、方位角的各组叶面积和全部叶面积之比就可以了。反之, 知道了叶角分布函数也就能求出具有一定倾角和方位角的叶子面积占全部叶面积的份数。Myneni 等人(1989)综合评述了测量 $g(\theta_L, \varphi_L)$ 的许多间接方法。

在大多数的分析中, 一般假定没有占优势的方位角, 这时 $g(\theta_L, \varphi) = g(\theta_L)$, 因而方程(1.8)简化为:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} g(\theta_L) \sin\theta_L d\theta_L = 1 \quad (1.11)$$

许多群丛叶子的倾角和方位角分布是均匀一致的(亦称球形叶角分布或随机叶角分布)。在这种情况下有 $g(\theta_L, \varphi_L) = 1$ 。

Ross(1975)发现一种较为简单的数量特征——叶面倾斜指数 X_L , 很适合于辐射传输的有关计算。 X_L 定义为: