

# 农田林网中风速分布 的数值模拟

---

张翼 著

气象出版社

# 农田林网中风速分布 的数值模拟

张翼 著

气象出版社

(京)新登字 046 号

农田林网中风速分布的数值模拟

张翼著

责任编辑：庞金波

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)

北京航空航天大学印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 6 3/8 字数: 150 千字

1992年6月第一版 1992年6月第一次印刷

印数: 1—1,000 定价: 9.50 元

ISBN 7-5029-1043-3/S·0154

## 内 容 简 介

本书从湍流自由射流边界层物理模型出发,获得林带背风防护区中近地面大气边界层风速分布模式为误差函数分布;迎风防护区中相对风速分布为二元幂函数的对数分布;林网中风速矢量分量服从上述模式的矢量合成模式。

在上述理论工作基础上进行了数值模拟试验,根据矢量合成模式讨论了任意林带特征(透风度与林带高度),任意网格面积,形状和任意风偏角条件下的林网中风速分布和防风效应,可为林网的规划设计工作提供理论依据。

本书可为从事微气象学、林业气象学,防护林学和复合农林业工作的研究人员,大学教师、研究生参考,亦可为从事林网规划设计的技术人员使用。

## 前 言

农田防护林是一种为了防治自然灾害,改善近地面小气候、土壤、水文条件,创造有利于人类生活和动植物生长发育的环境,以促进农林牧业稳定高产,并为人民生活提供多种效用的人工复合生态系统。

在当今的世界上,通过人类活动既能大面积地改造自然景观,改善人类生存的生态环境,又能抗御和减轻自然灾害并获得经济效益的切实可行的措施为数并不很多。大规模地营造防护林当推有力措施之一。科学地营造防护林可以产生良好的空气动力学效应、热力效应、水文效应、生物效应、改良土壤和净化环境。防护林的积极作用已为大量的研究工作和生产实践所证明。但是,同世界上一切事物都一分为二一样,防护林本身也有助地等副作用,不合理地营造防护林会产生消极的结果。因此必须加强对防护林的科学研究工作,扬长避短,充分合理地发挥防护林在生产实践中的作用。

最早的防护林是 18 和 19 世纪在苏格兰滨海区营造的防风林,它使这一地区得以开发利用。目前有计划地营造防护林,而且具有国家一级规模的国家主要有前苏联、美国、丹麦和中国。近些年来,在非洲、南美和亚洲的不发达国家中营造防护林也受到越来越高的重视。我国的农田防护林的营造历史大致可分为三个阶段:第一阶段是以防止风沙灾害为目的的农民自发营造的自由林网阶段,这个阶段到解放前后已有百余年的历史;第二阶段从解放后到 60 年代末期,以改善农田小气候状况,抗灾保产为目的的国家或集体大规模地规划和营造农田防护林网的阶段;自 70 年代至今的第三个阶段是

以改造旧有的农业生态系统为目的,即把农田防护林作为农田建设的一项基本内容,实现山、水、田、林、路综合治理,建立农田防护林综合体系的阶段。据不完全统计,我国已有农业林网 2.5 亿亩,加之林粮间作,其他防护林和村镇绿化四旁植树等总面积达 3.5 亿亩左右。我国农田防护林营造工作的成绩和经验已经引起国际有关组织和同行学者的高度评价和重视。联合国粮农组织在对我国林业状况进行考察后,肯定了我国农田防护林的经验,号召大多数国家在农村中制订发展农、林、牧的规划时要向中国学习。

防护林的科研工作伴随营造实践而产生的,也是随之发展而发展的。但是,将防护林做为一个独立领域,将防护林学作为独立的一门学科正式地有组织地进行研究,在许多国家中都是本世纪以来的事情。人们对防护林的效应和效益、规划设计、营造和经营管理等多方面进行了大量的观测、实验和总结,促进了学科本身和营林实践的发展。但是,还有一些重要的和基本的问题没有解决或者还没有彻底解决。

### 1. 防护林的空气动力学效应

众所周知,防护林的存在首先和最主要地是改变了它周围的流场,表现在防护林的防护区中风和湍流运动状态的改变,造成防护区附近的流场是一个非均匀的流场,这就使防护林的空气动力学效应的研究比起通常水平均匀下垫面上的微气象研究要复杂的多。从风场的研究来看,尽管人们对林带防护区中的风速分布和防风效应进行了大量的观测实验,了解了许多特定条件下(指特定的林带特征和特定的环境条件)的风速分布状况,但是还回答不出林带和林网防护区中风速分布的一般规律及其数学表达形式。因此也就无法知道在任意条件下林带林网的防风效应,不能事先为规划设计提供出确切的指导原则和数据,常常使营林工作带有一定盲目性。从湍

流状况的研究来看,这方面的实验微乎其微。林带和林网防护区中湍流结构服从什么样的规律?数学表达式是什么形式?它与林带特征和环境因子之间有什么关系?湍流的研究能为营林实践提供什么样的指导原则?对于这样一系列的基本问题的回答更是无从谈起。

## 2. 防护林的水文效应

它既反映了防风效应的影响,又直接对作物产量发生影响。这里面有两个问题尚不很清楚。①防护区中的蒸散问题,蒸散究竟比旷野减少了还是增加了?实验结果各异。蒸散问题对众多学科如水文学、微气象学、土壤学、生态学、农业气象学都是十分重要和非常敏感的问题,对防护林水文效应研究来说也是如此。②是防护区中水分,特别是土壤水分水平运动状况问题。防护区中环境因子的水平方向非均匀性问题在水分效应中也明显起着作用,有多少水分在不同水平距离处向什么方向传输了?我们心里是没有底的。因此防护区中农田的水分平衡问题和林带本身的水分平衡问题至今没有见到定量的研究报导,对水分平衡中某一个分量的研究并不能代表水分平衡问题的彻底认识。

## 3. 防护区中作物产量问题

众多的实验都证明防护区中作物较之旷野的作物产量是增加的。通常认为,由于防护林的效应使作物生长的小气候环境,土壤—小气候环境发生变化,特别是防护区中水分条件的变化促进了被防护作物的产量增加。但是防护林这种经济效益的机制仍然是不清楚的,反映在,是哪些具体的环境因子,通过何种途径使得作物的干物质累积或产量增加和在环境条件变化时,本身的生理、生化的特性等是否会改变。要深入弄清防护区中作物增产的机制,仅一般的了解林带—气流—小气候、土壤气候—产量之间现象上的联系是不够的,还必须对

于是量有关的生理过程以及它与环境条件之间的关系进行深入的探讨。

#### 4. 林网问题

林网是在林带的基础上发展起来的,对于一些幅员辽阔的国家,林网在防护林中占有很重要的地位。但是林网的防护效应和效益与林带有什么差别?造成差别的原因是什么?由于对上面已列举过的那些林带防护效应和效益的机制尚不清楚,因此更谈不上林网的问题,也就无从比较。再就是林网做为大面积的人工复合生态系统,它的总体防护效应是什么?这个问题不仅结果不清楚,恐怕连研究这个问题公认的研究方法还没有解决。

作者试图通过理论推导、野外模型试验和数值模拟方法讨论①林带背风防护区和迎风防护区风速分布的基本规律;②林网中风速分布规律及防风效应;③林网的防风效应与林带和网格特征、环境因子的关系及其在规划设计中的应用。希望本书出版能对防护林效应的基础理论研究有所促进,也希望为我国防护林网的规划设计工作从防风效应角度提出一些有实用价值的原则和建议。



# 目 录

## 前言

|     |                           |       |
|-----|---------------------------|-------|
| 第一章 | 大气边界层理论的基础知识 .....        | (1)   |
| 第一节 | 大气边界层和湍流 .....            | (1)   |
| 第二节 | Monin—Obukhov 相似理论 .....  | (20)  |
| 第二章 | 自由湍流射流的基础知识 .....         | (39)  |
| 第一节 | 自由湍流射流边界层 .....           | (39)  |
| 第二节 | 自由湍流射流边界层的解 .....         | (43)  |
| 第三章 | 有关防护林的一些基础知识 .....        | (50)  |
| 第一节 | 农田防护林带及其结构类型 .....        | (50)  |
| 第二节 | 林带动力效应的基本参数 .....         | (51)  |
| 第四章 | 林网防风效应研究概况 .....          | (61)  |
| 第一节 | 林带、林网防护区中风速分布规律研究进展 ..... | (62)  |
| 第二节 | 林带防风效应的研究进展 .....         | (65)  |
| 第三节 | 林网防风效应的研究 .....           | (75)  |
| 第四节 | 防风效应研究在规划设计中的应用 .....     | (79)  |
| 第五节 | 实验研究方法 .....              | (82)  |
| 第五章 | 林带防护区中风速分布规律 .....        | (88)  |
| 第一节 | 林带背风防护区中风速分布规律 .....      | (88)  |
| 第二节 | 林带迎风防护区中风速分布规律 .....      | (102) |
| 第三节 | 误差函数分布模式中参数选取 .....       | (112) |
| 第六章 | 林网中的风速分布规律和防风效应 .....     | (130) |
| 第一节 | 网格中的风速分布规律 .....          | (130) |
| 第二节 | 林网网格的防风效应 .....           | (142) |
| 第三节 | 林网的防风效应 .....             | (146) |
| 第七章 | 林带背风防护区中湍流垂直输送 .....      | (155) |
| 第八章 | 防风效应在林网规划设计中的应用 .....     | (161) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 第一节 林网的方位与防风效应 .....    | (161) |
| 第二节 林网的面积、形状与防风效应.....  | (167) |
| 第三节 林网中林带透风度问题 .....    | (179) |
| 附 录.....                | (179) |
| I 林带背风防护区中风速资料 .....    | (179) |
| II 林带迎风防护区中风速资料 .....   | (182) |
| III 林网网格中相对风速分布资料 ..... | (185) |
| 参考文献 .....              | (190) |

# 第一章 大气边界层理论的基础知识

## 第一节 大气边界层和湍流

### 一、大气边界层、近地层

在讨论大气边界层和湍流之前,首先要对近地球表面大气的基本特点做一了解。可以设想把大气分成若干水平层次(图 1.1)。大气边界层通常指由地面到 1—1.5km 的一层大气,有时也叫做行星边界层或摩擦层,这是介于近地面的扰动气流与上层大气之间的过渡层。大气边界层中还可分出一个贴地面的副层,高度大约由地面到 50—100m,称为近地面层。在这层中常常考虑稳定的力源项,而不考虑地转偏向力。这一层次是与人类活动,社会经济发展关系最密切的一个大气分层。在近地层中,最重要的特点就是它具有湍流摩擦应力,实际上常常认为湍流摩擦应力不随高度增加而改变。

湍流摩擦应力或称之为湍流切变应力的产生与气流沿表面(如地表面)运动有关。

当流体沿着一个表面流动时,靠近表面的质点受到粘滞力的作用,流速减慢了;和表面相接触的质点,因为粘着在表面上,实际上它们的速度是零;而在粘着在质点上面流动着的流体质点,由于流速比较快和比较慢的质点间的相互作用,它们的流速也减慢了;这样就产生了切变应力。在层流运动中,流动是平滑、成层状的,相互作用发生在亚微观层中,称为粘滞切变应力。在湍流运动中,流体成团或呈“球状”相互作用着,作用力被称为湍流切变应力。

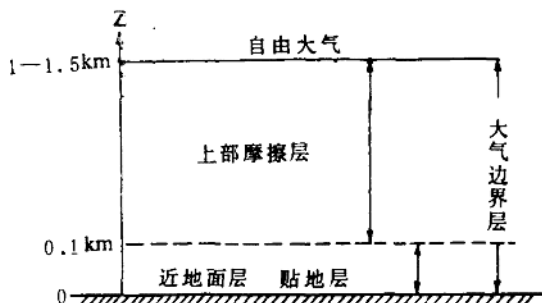


图 1.1 空气运动分层示意图

在边界层上发生的切变应力会影响到流体的内部,但是在离开表面一定的距离之外,流体质点的速度就接近于未经扰动时的速度了。所谓边界层是指受到发生于表面的切变应力影响的流体层。

近地层又可分为外边界层和内边界层。

在一个平面上或叶片的周围存在着一层薄的静止空气层,即层流副层。这个层在气流中和一个过渡层相邻,这个过渡层在离该平面或叶片的某一高度之上渗入自由扰动气流。

下面把内、外边界层加以区分。

当空气在大地上流动时,地面摩擦力的作用导致了边界层的形成。规定边界层的高度为:该处的风速是它上面自由大气风速的 99%。此层可作为外边界层。但是每一块粗糙度和高度不同的田野或地形都影响其上空的气流,并在外边界层之内形成了与每一块地表面相对应的内边界层。这两个边界层并不是完全独立的。例如 Yeh 和 Nickerson 介绍了一个风洞实验,当气流由光滑表面向粗糙表面过渡,内边界层随之升高时,外边界层亦随之调整而升高(图 1.2)。

外边界层厚度的变化通常在 10m 至 100m,这主要取决

于与地球上大的地貌，例如山脉、海洋、平原等有关的地形与位置。

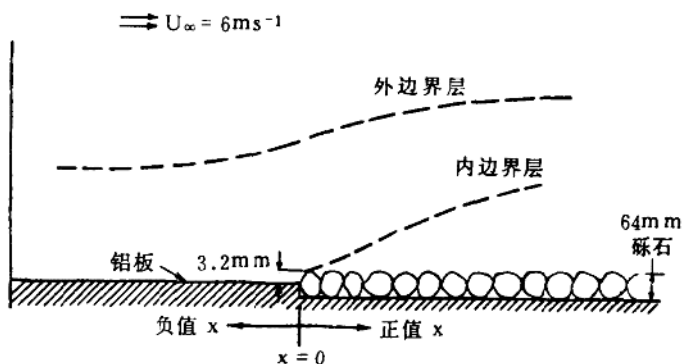


图 1.2 风洞里内粗糙度改变而形成的内、外边界层

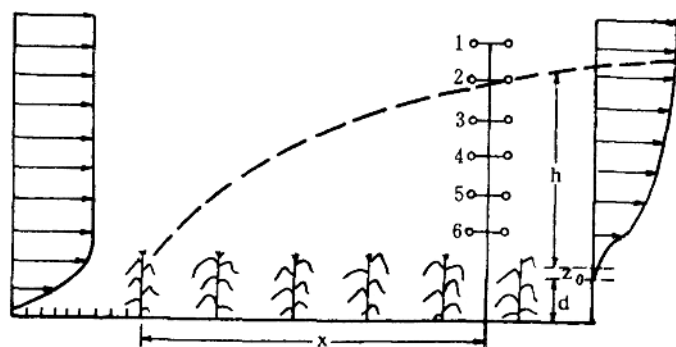


图 1.3 玉米地里边界层形成的示意图

Lemon 叙述了野外地区风经过低秆作物吹到高秆作物时，内边界层的发展过程(图 1.3)。在低秆作物区，由于风速在大约 2m 高处才开始减小，于是那里的风速随高度的变化显示出一个相对较低的内边界层。而在玉米地上面充分发展的内边界层在田野上扩展到很高。边界层的高度  $h$  是离这块

地的前缘距离  $x$  的函数。

## 二、近地层中湍流<sup>①</sup>

### 1. 湍流和湍流扩散方程

湍流是一种不规则的运动,在这种运动中,无论速度的空间分布或时间变化,都具有统计学的规律性。大气运动经常都是极不规则的脉动,研究这类不规则的湍流运动时,通常把运动分成两部分:即平均运动和速度涨落或脉动速度。平均运动用平均速度  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$  表示,脉动速度用  $u'$ 、 $v'$ 、 $w'$  表示。因此任一时刻水平风速和垂直运动的瞬时值可表示为

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w'$$

而且  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 、 $\bar{w}$  还可写成

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{1}{2}T}^{t_0 + \frac{1}{2}T} u \cdot dt$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{1}{2}T}^{t_0 + \frac{1}{2}T} v \cdot dt$$

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_{t_0 - \frac{1}{2}T}^{t_0 + \frac{1}{2}T} w \cdot dt$$

这种平均的示意图可见图 1.4。上述式中  $T$  为进行平均

---

① 本段基本知识主要参考了文献翁笃鸣等(1981)。

的时间间隔,  $t_0$  是时间间隔的中心, 代表平均值出现的时刻。脉动风速的平均值都等于 0, 即

$$\bar{u}' = \bar{v}' = \bar{w}' = 0$$

但是不能肯定脉动风速的平方及乘积的平均值 (如  $\bar{u'^2}$ ,  $\bar{u'v'}$  等) 必然为 0

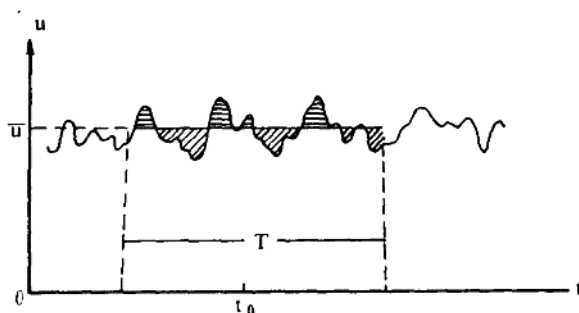


图 1.4 风速平均示意图

对于质量为  $\rho$  的单位体积空气, 通常受到 4 种力的作用:  
①气压梯度力  $\vec{G}$ ; ②地转偏向力  $\vec{K}$ ; ③分子粘性力  $\vec{R}$ ; ④重力  $\vec{P}$ 。

所以用矢量形式表示的大气运动方程为

$$\rho \frac{d\vec{C}}{dt} = \vec{G} + \vec{K} + \vec{P} + \vec{R} \quad (1.1)$$

在气象学中运动方程通常以直角坐标系表示, 那么上述方程在  $x, y, z$  方向上的分量可由下列方程组表示

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + 2\rho(\omega_z v - \omega_y w) + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial u}{\partial z} \\ \rho \frac{dv}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + 2\rho(\omega_x w - \omega_z u) + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v}{\partial z} \\ \rho \frac{dw}{dt} &= -\frac{\partial p}{\partial z} + 2\rho(\omega_y u - \omega_x v) - g\rho + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right\} (1.2)$$

式中  $u, v, w$  都是瞬时速度, 另外式中粘性力项只写上分子粘性力 ( $\mu \frac{\partial u}{\partial z}, \mu \frac{\partial v}{\partial z}, \mu \frac{\partial w}{\partial z}$ ), 而未写湍流粘性力, 这种力的作用只有当小体积空气与周围空气发生相互作用时才产生, 这就是我们需要讨论的。

为了方便, 仅对方程组中第一个方程, 即  $x$  方向的分量加以讨论其余可依此类推。由于气象观测值一般都是平均值, 而不是瞬时值, 所以需以下列关系代替 (1.2) 式的瞬时值。即以

$$P = \bar{P} + P', P = \bar{\rho} + \rho', u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v', w = \bar{w} + w'$$

代入 (1.2) 上第一式, 考虑到气压脉动很小, 可以不考虑, 即  $P = \bar{P}$ , 而密度的脉动一般说不能忽视, 但为了方便通常总是把它当作常数看待, 即  $\rho = \bar{\rho} = \text{常数}$ , 把空气看做是不可压缩流体。再应用不可压缩流体的连续方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

并以



$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.4)$$

把(1.2)式的第一式改写成

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2(w_z v - w_y w) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} u \frac{\partial u}{\partial z} \quad (1.5)$$

现将上述瞬时值的表达式(1.3)、(1.4)代入(1.5)并加以平均,可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} \cdot \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u} \cdot \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u} \cdot \bar{w}}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + 2(w_z \bar{v} - w_y \bar{w}) \\ & + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} u \frac{\partial u}{\partial z} - \left( \frac{\partial \bar{u}' \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{w}'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.6)$$

如果再应用平均的连续方程

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

那么(1.6)式就可写成

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) = & -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x} + 2\rho(w_z \bar{v} - w_y \bar{w}) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \rho \left( \frac{\partial \bar{u}' \bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}' \bar{w}'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1.7)$$

或