

## 防护林带: 湍流的数学模型与计算机模拟

WANG Hao Takle Eugene S SHEN Jinmei

Department of Computer Science and Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011;  
E-mail: wanghao@cs.iastate.edu, gstakle@iastate.edu, jinmei@cs.iastate.edu

**摘要** 虽然防护林用于减小风速、控制热量和水汽传递及污染物扩散、改善气候与环境、增加作物产量等已经有几百年了,但直到近几十年,人们才开始系统地研究防护林空气动力学的遮蔽机制。在本综述中,我们考察了绕防护林带的流动与湍流控制机制,最新的模型与数值模拟研究情况;通过数值模拟与实验数据的比较,来了解防护林带结构与防风效果之间的关系;讨论数值分析如何及为什么能够得到所需要的结果。本文将从多孔隙防护林带流动基本方程组的推导开始,讨论数值模型及模拟过程,对附体与分离流动进行预测;分析了遮蔽机制与动量交换;对风向、防护林密度、宽度和三维性对流动与湍流的影响作了系统的论述。还对热流和土壤水分蒸发的新模型及数值模拟作了简述。最后,我们对网络工作站、群和高性能分布式并行计算机及其对防护林带模型预报能力的提高作了讨论。

**关键词** 湍流, 空气动力学, 风工程, 环境流体力学, 多孔介质流动, 热量和水分传递, 并行与分布计算。

### 1 引言

人类一直在利用树木和大型植被结构来防止阳光、风、沙和雪的伤害。随着农业社会的出现,树和其他植被的种植不仅为人类,也为作物和动物提供了一种自然的保护措施。随着农业与自然景观管理的复杂性以及人们对不同种类植物生态系统之间物理和微气候相互作用兴趣的增加,需要更进一步了解植被结构对空气流动的改善机制。流过三维多孔隙不同种类植被结构的一般流动非常复杂,但简化了的二维生物屏障,如防护林带的研究,对促进湍流科学的发展及其最新原理的具体应用都带来了机遇。本文对流经植被的湍流流动理论的最新进展及其在农业防护林方面的应用情况作了评述。

任何防护林带的首要功能都是减小风速。风速的减小将影响湍流传递过程,并改善遮蔽区的微气象条件。遮蔽程度和遮蔽区范围的大小由林带的孔隙结构、高度、形状及环境条件如风向等决定。风速及湍流的实验研究包括实验室风洞模型及现场全尺

度实验。van Eimern 等<sup>[1~4]</sup>对半个多世纪以来积累的实验数据作了分析与解释。文献记载的多数防护林带研究都是实验方面的,都着重研究林带对风速减小的作用。在防护林带空气动力学的综合了解方面,一直进展缓慢,即使相对简单的均匀孔隙度置于无限长平整地面上的人工直线屏障的情况,也是如此。

远尾流区( $X > 10H$ ,  $H$  为障碍物高度)的分析解较易获得,但它远离障碍物。在遮蔽效果最好的区域( $X < 10H$ ),流线形状变得重要,定量结果相当复杂,难以由分析得到。Kaiser<sup>[5]</sup>假定遮蔽区动量损失由被动标量的扩散补充,得到一个误差函数公式。这个模型在物理上无法刻画复杂的湍流流动,不能期望它能准确预报风速减小峰值所在的位置。Plate<sup>[6]</sup>讨论了问题的复杂性,发现绕防护林带的流动有 7 个以上的流动状态。

Wilson & Shaw<sup>[7]</sup>发表了植被冠层内流动的开创性理论工作,他们导出了非浮力流在大水平面范围内平均以后的一维方程组。Raupach & Shaw<sup>[8]</sup>将该工作推广到水平方向均匀冠层的讨论。Finnigan<sup>[9]</sup>将

\* Annual Reviews www.AnnualReviews.org 惠允翻译此文 (with permission from Annual Review of Fluid Mechanics, Volume 33, ©2001, by Annual Review www.AnnualReviews.org)

植被层内的面平均推广为体平均. 着重考虑防护林带理论和数值模型的工作由 Kaiser 等<sup>[5,6,10,11]</sup>发表.

最近几年来, 计算机和计算技术的进步及更好的数值模型和模拟技术的使用, 使我们对防护林带空气动力学与湍流流动机制有更深入地认识. 对流场精细、深入的了解是一个复杂的分析和数值问题, 其完全的解决需要求解完整的湍流 N-S 方程组.

将空气动力学流动模型推广到包括大气层非中性效应, 需要特别注意加热和蒸发效应. 土壤表面的蒸发和植物的蒸腾作用, 依赖于土壤水分的存量和运动. 到达地表的太阳辐射能可分为反射太阳能、感热、蒸发及传入土壤的热量, 为此, 要求将土壤分成若干层. 采用大气与表面 / 植被一维耦合模型, 已成功模拟了这些具有相当大复杂性的过程, 并应用于区域与全球气候模型<sup>[12]</sup>. 近边界流动的这一些一维模型, 由阻力和阻力系数来描述表面 / 植被的空气动力学性质, 没有考虑通过植被内的流动本身.

直到 90 年代, 人们才尝试将数值模拟推广到不同种类植被群的空气动力学, 预计此时上游的植被将对下游异种植被区的平均和脉动流场产生影响. 没有障碍物存在时, 用雷诺平均的 N-S 方程是合适的. 与此不同, 多孔隙障碍物, 如森林或作物, 绕过或穿过其内部的平均和湍流脉动流, 很大程度上依赖于植被的物理性质. 所有描述流动的物理变量, 如风速、压力、温度、湍流变量, 及描述平均和脉动特性的方程组, 都是定义在障碍物内部孔隙的空气中的, 这些变量在固体元所占空间中没有任何意义. 障碍物固体元成为大气边界层流动的内部边界, 这样的边界条件使问题变得复杂. 只有具有简单几何形状的二维人工障碍物, 如带圆形孔的篱墙或平面, 才有可能对流动的障碍物边界条件做出详细描述. 对天然树木的防护林带和大多数人工防风体, 固体元的边界太复杂, 太不规则, 无法精确描述. 幸好我们不必知道固体元边界的所有细节, 因为防护林带研究的主要目的在于描述防护林外保护区内的流动, 而不是防护林内部的流动. 我们可以忽略防护林带内部复杂的固体边界结构, 由障碍物表面对空气流动的阻力来描述它们的整体效应<sup>[13~32]</sup>.

为了研究防护林空气动力学机制及其依赖于林带结构(孔隙度, 三维性, 形状)和环境条件如风速和动量收支的情况, 我们给出了多孔介质流动与湍流一般方程组的推导<sup>[20]</sup>, 并建立了防护林边界层湍流

模型<sup>[19~21,23~36]</sup>. 我们还将此模型推广用于研究林带对热流和蒸腾的影响. 由于复杂性的增大需要用分布式并行计算技术对模型进行优化. 因此, 以下几节我们将摘要介绍这些结果, 并对今后数值模拟在绕不同种类植被群流动中的应用提出建议.

## 2 数学模型

### 2.1 气相高波数平均

空气通过多孔隙刚性障碍物的流动是一个气-固两相系统. 在这种两相系统中施行的平均过程将不同于纯流体流动. N-S 方程仅在多孔隙障碍物体内空气相所占空间中有意义, 而在体内固体元所占空间中并没有意义. Wilson & Shaw 等<sup>[7,8,37,38]</sup>对(物理量)实施包括固体元在内的空间平均, 并认为空间平均具有超出纯统计过程的物理意义. 然而, 这些早期研究并没有考虑到两相空间平均与单相空间平均之间的差别. 两相介质的体积平均过程与通常用于流体动力学中湍流的体积平均, 虽然都是在空间体积上实施平均, 但却有本质的区别. 通常的湍流体空间平均意在得到一个稳定的湍流统计状态和平均量, 在气-固两相介质中引入气相平均意在避免多孔介质流动中固体元的存在所带来的不便, 又能得到一组包含固体元影响(但不包括固体元本身), 且适用于整个空间的方程组. 通过这个过程我们把非常复杂的固体障碍物边界效应转化为方程组中的附加项, 使方程组的物理变量在整个空间中连续. 为了辨别多相体积平均与通常的单相空间平均的不同, 避免与波相角平均相混淆<sup>[9]</sup>, 我们采用化学工程中的术语<sup>[39]</sup>来称呼气-固两相介质中空气体积平均为空气相平均 (air-phase averaging) 为了清楚地说明气相平均过程需要引入 3 个长度尺度:  $d$  代表各障碍物的特征尺度,  $L$  代表大气湍流边界层特征尺度,  $D$  代表平均体积尺度.  $D$  值可任意选取, 平均运算可抹平高于  $2\pi/D$  波数的湍流脉动. 然而, 由障碍物产生的尾迹湍流是最重要的, 正如它与大气剪切湍流相互作用将带来湍流的不同特征, 从而导致湍流封闭模式中参数和常数的变化. 这儿的平均体积取得足够小, 以消除特征尺度为  $d$  的固体元结构的影响. 对于作物和森林, 我们有

$$L \gg d \quad (1)$$

相应地, 在雷诺平均下略去的最小波数  $2\pi/D$  远高

于  $2\pi/L$ . 因此, 气相平均不仅允许在定义于整个空间的方程组中体现各障碍物元的影响, 而且还属于高波数平均. 在植被环境中观测到的, 由植被产生的高频湍流脉动, 在湍流能谱中呈现双峰<sup>[40]</sup>.

总体来讲, 各障碍物之间的空间不大到足以产生稳定的湍流统计量时, 我们不能先用时间平均, 后用空间平均来得到近似的气相平均方程组. 我们也不能用大空间范围内的平均去得到时间上稳定的平均值和脉动统计值. 这样做会失去所平均的空间内各障碍物元之间湍流的相互作用和能量级串传递过程的信息.

按以上步骤, 我们得到气相高波数平均的连续方程

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

气相高波数平均的运动方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} = & -\langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \frac{\partial \langle \ddot{u}_i \ddot{u}_j \rangle}{\partial x_j} - \\ & \varepsilon_{ikl} f_k \langle u_l \rangle - \beta g_i \langle \theta \rangle - \\ & \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j^2} - \\ & \left( \frac{1}{V} \int_s \int p n_i dS' - \frac{\nu}{V} \int_s \int \frac{\partial u_i}{\partial n} dS' \right) \end{aligned} \quad (3)$$

在方程(3)中, 最后两项分别代表所平均体积内压力和体元表面风剪切力的积分, 它们是由障碍物元产生的压差阻力和摩擦阻力造成的动量损失 (momentum sinks). 阻力由 Thom<sup>[41]</sup> 引入的通用公式来表示

$$F_i = \rho_0 C_d A U u_i \quad (4)$$

这里  $\rho_0$  是空气密度,  $C_d$  是单位植被面积密度的阻力系数,  $A$  是植被面积密度,  $U$  是平均风速.

经过气相高波数平均以后, 可得到高频湍动能  $E$  的方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & -\langle u_k \rangle \frac{\partial E}{\partial x_k} - \langle \ddot{u}_i \ddot{u}_k \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} - \\ & \beta g_i \langle \ddot{u}_i \ddot{\theta} \rangle - f_k \varepsilon_{ikl} \langle \ddot{u}_i \ddot{u}_l \rangle - \\ & \frac{\partial \langle \ddot{u}_k E \rangle}{\partial x_k} - \frac{\partial \langle \ddot{u}_i \ddot{p} \rangle}{\partial x_i} + \left\langle \ddot{p} \frac{\partial \ddot{u}_i}{\partial x_i} \right\rangle + \\ & \nu \frac{\partial^2 E}{\partial x_k^2} - \nu \left\langle \frac{\partial \ddot{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \ddot{u}_i}{\partial x_k} \right\rangle + C_d A U \langle u_i \rangle^2 \end{aligned} \quad (5)$$

方程(5)中最后一项代表由通过各障碍物元的空气流阻力形成的, 从空气流平均动能向尾流高频湍动能的

转化. 这些方程适用于包括各障碍物源所占空间在内的所有空间, 除了阻力公式 (被广泛接受的) 和阻力系数 (经过对各种各样障碍物的大量现场观测和实验室风洞研究, 确定它为常数) 外, 没有作任何假设.

这个过程将两相问题转化为纯空气的单相问题, 得出了关于障碍物元所产生的高频尾流脉动的方程组.

## 2.2 雷诺平均

现场观测和实验室测量表明, 在多孔障碍物附近及其内部的湍流谱具有双峰. 正如上节高频应力方程所描述的, 高频峰是由障碍物-空气相互作用产生的. 在实际观测到的湍流水平上, 高频成分耗散较快, 对整个冠层湍流的贡献很小<sup>[7,8]</sup>. 但也可能与剪切湍流相互作用, 改变湍流结构, 因而改变湍流封闭模式中的参数和常数.

我们用气相高波数平均来获得在整个空间 (包括固体元所占部分) 上, 在数学和物理上都连续的方程组. 我们不需要气相高波数平均的体积大到足够得到稳定的统计平均流动和稳定的湍流统计量. 正如上节所讨论的, 平均的体积具有最小特征尺度  $D$ , 它只是消除障碍物结构对波数为  $2\pi/D$  以上的流动的影响, 这个波数远高于剪切湍流的波数. 因此我们必须所有波数下用通常使用的空间或时间平均方法, 以获得统计稳定的平均量和脉动量的方程组. 因为我们已经对仅适用于多孔介质中气相所占空间上的 N-S 方程组转化为多孔介质方程组, 它如同纯大气一样, 在整个空间上有定义. 时间与空间的平均程序与在纯大气中所用的常规方法一样. 以雷诺平均为例, 平均运动方程可写成

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial t} = & -\langle u_j \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} - \\ & \frac{\partial \langle \ddot{u}_i \ddot{u}_j \rangle + \langle u_i \rangle \langle \ddot{u}_j \rangle}{\partial x_j} - \\ & \varepsilon_{ikl} f_k \langle u_l \rangle - \beta g_i \langle \theta \rangle - \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \\ & \nu \frac{\partial^2 \langle u_i \rangle}{\partial x_j^2} - C_d A U \langle u_i \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

与没有障碍物的大气方程组相比, 连续性方程形式相同, 但平均运动方程有两个附加项 (式中用粗体标出). 这两项有清楚的物理意义: 最后一项是著名的阻力公式, 是障碍物元作用于平均空气流的阻力; 而另外一个是与雷诺应力有关的附加项, 是高频湍流脉动应力平均值, 它描述由障碍物元产生的高频湍流

脉动对平均流的平均效应. 在我们的推导中产生的两个附加项, 虽然在形式上与前人发表的结果类似, 但其物理本质与前人结果中的频散项不同. 障碍物元产生的高频脉动流的时间与空间尺度远小于由风剪切和温度层结产生的低频脉动. 因此, 时均变量的空间平均不能表现高频脉动成分, 与障碍物元相互作用的也不是稳定的时均风场.

低频湍流动能方程可以写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} = & -\overline{\langle u_k \rangle} \frac{\partial e}{\partial x_k} - \overline{\langle u_i \rangle' \langle u_k \rangle'} \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_k} - \\ & \beta g_i \overline{\langle u_i \rangle' \langle \theta \rangle'} - f_k \epsilon_{ikl} \overline{\langle u_i \rangle' \langle u_l \rangle'} - \\ & \frac{\partial \langle u_k \rangle' e}{\partial x_k} - \overline{\langle u_i \rangle' \frac{\partial \langle u_k \rangle' e}{\partial x_k}} - \\ & \frac{\partial \langle u_i \rangle' \langle p \rangle'}{\partial x_i} + \overline{\langle p \rangle' \frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_i}} + \\ & \nu \frac{\partial^2 e}{\partial x_k^2} - \nu \overline{\frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_k} \frac{\partial \langle u_i \rangle'}{\partial x_k}} - 2C_d A U e \quad (7) \end{aligned}$$

这个方程也包括两个附加项(用粗体表示), 它首先由 Wang & Takle<sup>[20]</sup> 导出. 此方程体现了与障碍物元相互作用引起的脉动流统计值的变化. 由时-空平均的低频流速波动与来自时-空平均的高频脉动流速协方差的波动相互作用, 产生由前一个附加项表示的能量的重新分配. 后一个附加项在多孔障碍物流中是最重要的, 它描述大尺度运动分裂为小尺度运动时湍流能量的级串传递过程. 湍动能通过两个过程产生耗散, 一是分子耗散, 二是能量级串传递过程. 因为物理过程已被方程组(7)中的这两个附加项所捕获而无须引入修正的混合长. 这个过程取代前人所用的一步平均过程. 一步平均仅得到一个湍动能方程, 物理上无法区分障碍物产生的脉动能和由低频传向高频的能量.

Wang & Takle<sup>[20]</sup> 指出, 传统上用混合长既体现分子耗散, 又体现湍流能量传递过程的做法, 既没有必要, 物理上也不简明. 以前的研究者通过反复调整分子耗散混合长以使计算与观测数据吻合. 这种调整过程可明示于下, 湍流能量耗散和传递过程可重写为以下形式

$$\begin{aligned} 2C_d A U e + \epsilon_e = 2C_d A U e + \frac{e^{3/2}}{\Lambda} = \\ e^{3/2} \left( 2C_d A U e^{-1/2} + \frac{1}{\Lambda} \right) = \frac{e^{3/2}}{\Lambda'} \quad (8) \end{aligned}$$

其中  $\Lambda'$  是低频脉动分子耗散(包含一个常数)的混合

长,  $\Lambda'$  是研究者用来调整与观测数据匹配的“混合长”. 根据我们的结果,  $\Lambda'$  与  $\Lambda$  及障碍物元阻力有如下关系

$$\frac{1}{\Lambda'} = \frac{1}{\Lambda} + 2C_d A U e^{-1/2} = \frac{1}{\Lambda} + 2^2 C_d \frac{A}{\sigma} \quad (9)$$

其中  $\sigma$  是湍流度. 由方程(9)我们可得出结论,  $\Lambda'$  不仅与障碍物元的  $C_d A$  和  $\Lambda$  有关, 还与风速和湍动能有关. 这表示多孔介质流混合长不是通常所想象的, 仅仅是自由大气边界层混合长与障碍物元尺度的结合.

### 3 数值模拟

#### 3.1 基本方程的简化

上节导出的中性流动一般方程组由 Wang & Shen 等<sup>[39~16,19,21,25~29,35,36]</sup> 作了简化, 在此作简要叙述. 典型的防护林带大约高 10 m, 远比大气边界层高度低, 因而科氏力效应 (coriolis forces) 可忽略. 防护林一般种植成排并与主风向垂直, 其长度至少比其高度大一个数量级. 我们用一个准三维计算域 ( $z$  为垂直于大地的方向,  $x$  为垂直于防护林的水平方向), 其中在  $y$  方向为无限长, 但所模拟的流动是三维的, 与防护林带有倾斜夹角的来流流动也可模拟 (这在二维模型中是不可能的), 但所有计算的流场在  $Y$  方向是均匀的 (这比完整三维模拟简单但其普遍性减弱). 在这些条件下, 运动和连续方程可简化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \\ & \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} - C_d A U u \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x} - \\ & \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} - C_d A U v \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} - \\ & \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial z} - C_d A U w \quad (12) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

其中  $u, v$  和  $w$  分别是平均风速在  $x, y$  和  $z$  方向的分量,  $u', v'$  和  $w'$  是它们的脉动值. 为了方便,

我们略去了平均值上方的横线。  $p$  为压力扰动值,  $t$  为时间,  $\rho$  为空气密度。仿效 Thom 等<sup>[7,41]</sup>, 式(10)~(12) 每个方程的最后是防护林带所产生的参数化的阻力项。若干研究者用这种方法成功地模拟了森林和作物流动<sup>[7,42~47]</sup>。  $U$  为总平均风速,  $A(x, y, z)$  为叶面积密度 (LAD),  $C_d$  是单位 LAD 上的形状阻力系数。

平均运动方程 (10)~(12) 包含湍流应力项, 我们必须采用边界层湍流封闭模式。我们选择 K-E-1 封闭模式, 它须预先求解湍流动能方程 (TKE) 和主长度尺度<sup>[43,48~50]</sup>。

### 3.2 求解方法

我们要求解 8 个方程, 包括水平方向运动方程, 非静力垂向运动方程及质量守恒方程, 湍流动能和混合长度方程。我们用有限差分方法将这些方程离散化为一个三对角代数方程组, 对时间项用前差分格式, 压力项用中心差分, 对流项用迎风格式。修正的 Crank-Nicholson 格式用于湍流通量项<sup>[51]</sup>。我们用交替方向隐格式 (ADI) 方法在水平和垂直方向求解这些方程。由于包含动压力项, 这些方程为抛物-椭圆混合型。动压扰动梯度可从动量方程中消除。辅助流速场  $u^{aux}$  和  $w^{aux}$  由 Chorin<sup>[52]</sup> 格式计算。动压方程用逐次超松弛方法, 松弛因子 1.75, 逐次收敛判据为  $|\delta p_{max}| < 10^{-4} \text{ m}^2$ 。

## 4 绕防护林的流动与湍流

### 4.1 孔隙度与阻力系数

阻力系数由以下公式计算

$$k_r = \int_{-\infty}^{+\infty} C_d A dx \quad (14)$$

孔隙度与阻力系数  $k_r$  的关系已由许多风洞实验证实。以文献 [4] 中图 1 和文献 [53] 中公式为基础, 我们可估计对应于各形状阻力的孔隙度。我们必须强调, 孔隙度仅代表防护林带的平面几何结构, 但流动的变化应由动力学参数, 而不是几何参数更准确地刻画。阻力系数是动力学参量, 不仅依赖于孔隙度, 也依赖于障碍物元的形状。有相同孔隙度的障碍物可能有不同的  $k_r$  和不同的遮蔽效应。Heisler & Dewalle<sup>[4]</sup> 的评述说, Baines & Peterson<sup>[54]</sup> 曾报道在孔隙度都是 0.5 时,  $k_r$  的范围可从圆形材料格栅的 1.0 变到方棍形材料格栅的 3.2, Richards 等<sup>[55]</sup> 发现  $k_r$  有更大

变化范围, 在孔隙度都是 0.5 时, 由圆滑材料形成的格栅  $k_r = 1.5$ , 而由尖缘扁平体形成的格栅  $k_r = 5.0$ 。然而, 在流动显示时, 孔隙度的概念较容易理解, 如果可能, 在我们以后的论述中尽可能使用它。

### 4.2 不同孔隙度下的流型与流线

Wang & Takle<sup>[19]</sup> 考察了多孔防护林带从接近于固体 (孔隙度为 0) 到接近于空旷 (孔隙度为 1) 的整个范围的流动状态与湍流脉动特性。结果可分为 2 个不同的流态: 分离流动和无分离的流动。

#### 4.2.1 无分离流动

高孔隙度障碍物 (图 1a) 形成典型的无分离流特征。随着孔隙度下降, 流线弯曲程度增大。防护林上方流线密集, 防护林前侧流线更陡峭。与此相应, 存在 3 个区域: 迎风面减速区, 背风面减速区和防护林上方的高速区。当孔隙度下降到 0.3 时, 在背风面形成环流。

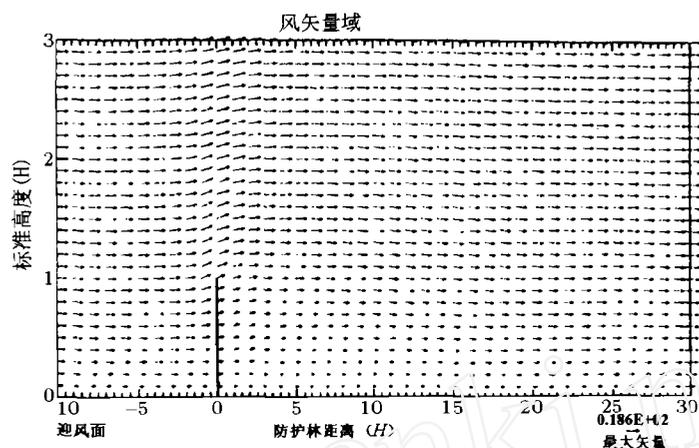
#### 4.2.2 分离流动

分离流特性是防护林带物理学和动力学的重要性质。关于防护林密度与防护效果之间关系的意见分歧主要集中于这种流态。图 1b 给出了典型分离流动的风矢量特征。孔隙度为 0.3 时, 出现很微弱的环流 (分离点在  $x = 5H$ , 再附点在  $x = 8H$ ), 驻点在  $x = 6.5H, z = 0.15H$ 。环流中心随孔隙度下降逐渐向上游移动。

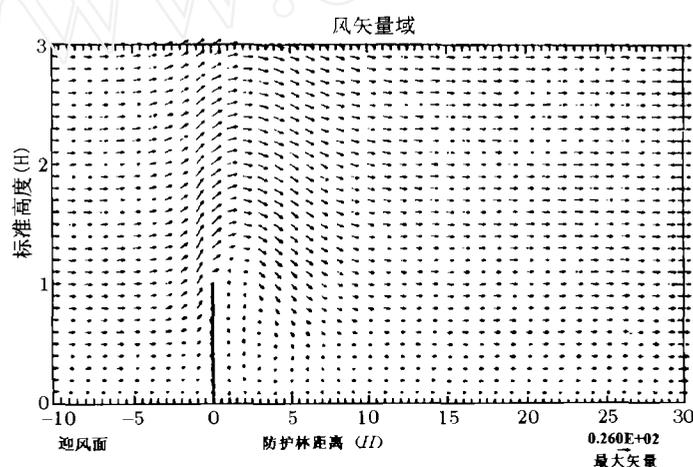
现有现场观测和烟线实验表明, 孔隙度小于 0.3 的稠密防护林可在背风面形成环流分离泡<sup>[4,56,57]</sup>。据观测, 当环流在临界孔隙度 0.3 出现时, 环流泡很小, 环流很微弱。即使孔隙度达到 0.27 (阻力系数 4.0), 模拟的最大逆风速度仍然小于 0.5 m/s。高度扭曲的流动其测量非常困难, 由于逆向风速很小, 远的下游微弱的环流很可能观测不到。

Perera<sup>[56]</sup> 在风洞中对孔隙度从 0~0.5 的各种格栅模型做了广泛的实验。他报道说, 环流泡从格栅 (孔隙度 < 0.3) 分离, 并随着孔隙度的增大而向下游移动。Perera<sup>[56]</sup> 的测量与早期 Castro<sup>[57]</sup> 的结果相符合。因此, 用前面所提到的模型进行的数值模拟结果, 在环流的出现与孔隙度的关系方面, 与观测结果相符。

Wang & Takle<sup>[19]</sup> 用数值模型得到了一系列防护林流动状态, 并描述了它们随孔隙度的变化。就像分离环流区大小和位置随孔隙度的变化一样, 最大风速



(a) 高孔隙度障碍物形成典型的无分离流线特征



(b) 典型分离流动的风矢量特征

图 1

衰减的位置及其随孔隙度的变化, 以及背风面风速恢复率, 整体上与实验室和现场测量一致. 障碍物从几乎完全空旷 (此时控制方程为抛物型) 到几乎为固体 (此时控制方程为椭圆型, 并存在分离流动), 模型对绕过和穿过障碍物的流动都能有真实的描述.

#### 4.3 流动与压力相互作用

这些模拟的一个值得注意的地方, 是障碍物内外压力场准确模拟的重要性<sup>[19,22,23,25~29,58,59]</sup>. 虽然这个问题有争议, 但我们仍然认为, 在障碍物内局部区域众多点上求得动量方程 (而不是整个地求解) 具有关键意义, 以便在障碍物上下游获得适当收缩或扩张的流场 (包括压力). 防护林的功能及特点决定了获得准确动压力的重要性. 内部穿过的流动及其扰动压与外绕流相互作用导致了障碍物远下游某处风速的最大亏损. 流场的收缩与扩张所产生的动压力改变了扰动压力场. 扰动压力不仅控制了分离流动的产生, 还控制了最大风速亏损点位置、流线弯曲程

度、防护林上方的风速增大以及背风面速度恢复率. 压力与流动相互作用产生了复杂的流态, 其流动特性在很大程度上由穿过障碍物的流量与无障碍物时流量的比值或透风系数决定. 透风系数由防护林带结构控制, 传统上以孔隙度或叶面积指数密度表示.

虽然背风面风速亏损区对实际应用具有最重要的意义, 但总体上说来, 流态的各个部分都是相互联系的. 防护林上方的超速度改变了流线弯曲程度, 因而改变了风速恢复率. 风向上的风速减小通过改变阻力和水平动量的垂向输运来影响超速区.

## 5 防护林三维性的影响

不像平面障碍物, 天然防护林带具有有限宽度. 在此宽度范围内风速、阻力和扰动压力之间的相互作用, 决定了总的防风效果. 由于野外环境中天然树木防护林带的实验条件很难控制, 大量的实验是用人

工格栅或屏网置于实验室风洞中 [56,60,61] 或者在大气边界层中进行的 [62,63]。结果人工格栅或屏网 (厚度接近于 0) 的空气动力学与遮蔽效果, 包括决定遮蔽效果的防护林带密度 (孔隙度) 的作用大体上得到了了解。然而天然防护林带具有有限宽度和三维体积空间, 在此空间内风流过障碍物宽度, 导致完全不同于具有二维缝隙的人工格栅或屏网的空气动力学效应 [4,64,65]。在现场观测和实验室风洞测量中, 想从整个密度影响中区分出宽度的影响, 如果不是不可能, 也是很困难 [1,4]。Wang & Takle [27] 发表了一系列基于前面所述模型系统的数值实验结果, 来研究防护林带结构三维性的影响。本节将对此作一总结。

### 5.1 透风系数及其受三维防护林结构的影响

透风系数  $\varphi$  定义为在背风面边缘处风速  $U_{x=0}$  与上游未扰动流速度  $U_0$  的比值, 它有时用以表示防护林密度大小 [1]。风速的改变是由防护林带的阻力引起动量损失的结果, 而如上所述风速的改变直接地改变阻力。因此, 防护林内部风速分布与透风系数的研究有助于对防护林结构及其宽度对动力学过程影响的理解。透风系数表示防护林抑制流动穿透的能力, 因此它与防护林内部风速变化紧密相关。图 2 是通过不同防护林的相对风速, (1) 单调增大, (2) 前方增大后方减小, (3) 单调减小, (4) 前方减小后方增大。风速变化的类型与防护林宽度及观测高度有关。

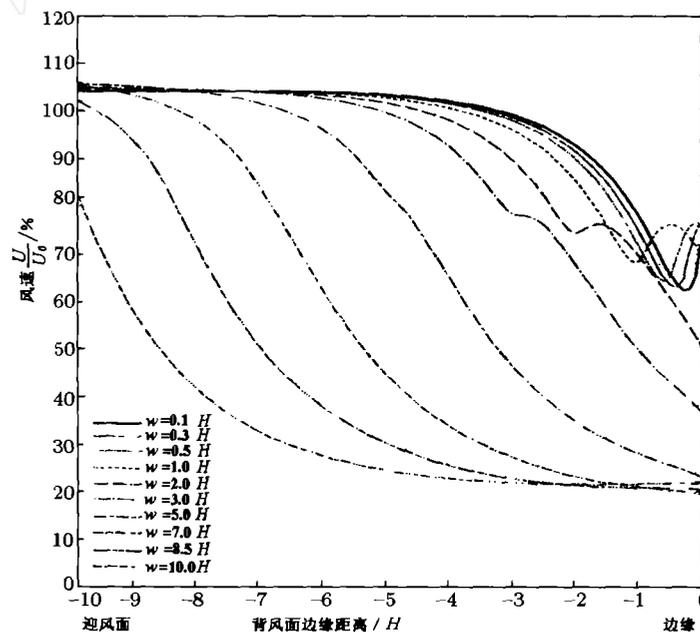


图 2 通过不同防护林的风速

### 5.2 扰动压力及其受三维防护林结构的影响

防护林作用于空气的阻力对压力形成扰动, 而扰动压又改变风速, 改变了的风速再次影响阻力。更进一步, 风场扩张 (divergence of the wind field) 也引起压力场的变化, 这种变化发生在防护林外, 不像阻力引起的变化那样, 只发生在防护林内部。因此扰动压在风速分布和遮蔽效应方面起重要作用。压力最大值出现在防护林迎风面 [19]。在背风面, 压力逐渐恢复到未受扰动的值。恢复率多少能反映压力随下游距离的复杂变化行为。风场的扩张使扰动压发生变化, 反过来又影响风速亏损。对于窄的防护林, 扰动压在  $x=(1\sim 6)H$  范围内变化很小, 而当  $x > 7H$  时扰动压恢复很快。最小风速的位置  $x_{\min}$  远离防护林带,

因此风场在  $x = 0 \sim x_{\min}$  之间的收缩产生了一个附加的正压扰动, 它往往补偿近背风区的负静压。超出  $x_{\min}$  范围, 由于风场扩张而产生一个附加的负压扰动。因此在背风区中间地带存在一个扰动压力平台 ( $(1\sim 7)H$ )。我们还发现, 防护林宽度小于  $3H$  时, 扰动压差别不大。而对于较宽的林带, 扰动压随宽度的变化很大, 宽度大于  $5H$  时, 背风面的扰动压力平台不再那么明显。

### 5.3 遮蔽效果及其受三维防护林结构的影响

遮蔽效果可以用很多不同的术语来表示, 但最常用的一个是遮蔽距离  $d_{20}$ , 定义为在下风方向经过这个距离风速减小 20%。最小风速  $U_{\min}$  (即最大风速亏损) 及其位置  $x_{\min}$  也常用以表现遮蔽效果 [4]。即便

这些点与整个水平方向风速剖面密切相关, 这些指标也仅能描述某些特殊点处的特征.

防护林密度改变引起水平风速剖面的改变情

况, 见图 3. 最小风速点的位置随防护林高度  $H$  的增大而向林带靠近. 当防护林宽度  $W_{SB} = 0.1H$  时, 最小风速点在  $x_{min} = 6H, z = 0.1H$ .

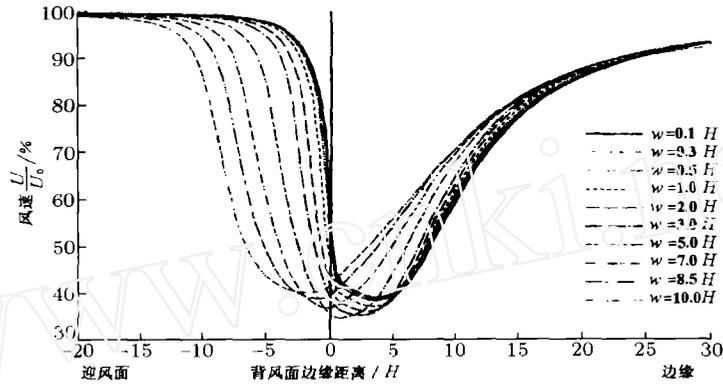


图 3 随防护林密度变化引起水平风速剖面的改变

随着宽度增加, 最小风速点也向林带靠近, 且有可能进入宽林带的 (负  $x_{min}$ ) 带宽内的高处. 最小风速点由  $W_{SB} = 0.1H$  时的  $6H$  移动到  $W_{SB} = 10H$  时的  $1.5H$ . 遮蔽距离  $d_{20}$  也随宽度的增大而减小, 但  $W_{SB} = 0.1H$  与  $W_{SB} = 10H$  之间的差别只有  $2.5H$ . 随宽度增加, 最小风速点向上游移动, 且可能出现在宽林带的内部. 各最小风速之间的差至多为 6%, 林带宽度为  $5H$  时, 最小风速有最低值.

就像文献 [1] 的图 12 中所引用的, Naegeli<sup>[66]</sup> 报道了窄的中密度林带与宽度为  $21.4H$  的针叶树林之间水平风速剖面的差别. 窄林带的  $x_{min} = 4H$ , 宽森林的  $x_{min} = -2H$  (在森林内部). 这与我们的数值模拟结果一致. 但是遮蔽距离  $d_{20}$ , 窄林带为  $16H$ , 宽森林区为  $10H$ , 大于我们的数值模拟结果, 这是因为观测数据未考虑林带密度影响所致. 宽度为  $21.4H$  的森林, 其密度可能非常大, 会导致背风面风速的快速恢复. Takahashi<sup>[67]</sup> 在风洞中测量了 68% 孔隙度, 宽度分别为  $0.5H, 2.5H$  和  $5H$  的乙烯塑料 (vinyl) 网的近区风速, 并在  $z = 0.25H$  高度测量到最小风速点分别在  $5H, 4H$  和  $1H$  处. 遮蔽距离  $d_{20}$  的差别很小 ( $2H$  以内). 这些结果与我们的模拟符合很好. 我们模拟的系数也与 Taylor<sup>[68]</sup> 的结果相符.

## 6 林带周围风向的变化

防护林通过减小风速和改变风向来影响流场. 前一种效应已经被大量研究过, 但后一种效应却研究得很少. 风向的定量观测比风速更困难, 尤其是在我们

赖以积累大多数防护林效应知识的风洞中测量. 只有少数研究者发表了遮蔽和非遮蔽场之间风向差别的定性和定量测量结果<sup>[1,69,70]</sup>. 防护林对微气候的改变情况依赖于风向<sup>[1]</sup>, 这是因为林带产生的阻力强烈依赖于通过障碍物的风轨迹. 然而几乎所有以前的理论和数值模拟都仅考虑相对较简单的, 风从垂直角度吹过置于平整表面、具有均匀孔隙的人工障碍物的例子<sup>[5,6,10,11,14~16,19,21,22,27,42,68]</sup>. 我们定义攻角  $\alpha$  为未受扰风向与防护林法线方向 ( $x$  轴) 的夹角. 我们计算了 50% 孔隙度的防护林, 攻角从  $0^\circ$  到  $90^\circ$ , 每  $5^\circ$  一个间隔, 共有 19 个不同攻角的流场.

当地风向角  $\gamma$  在防护林法线 ( $x$  轴) 方向的分布 (图 4) 表明, 存在 3 种迥然不同的风向改变区. 前方过来的空气, 向着平行于防护林的方向偏转, 最大偏转发生在障碍物正面. 接着在后面突然向相反的方向偏转. 偏转超过来流攻角后, 在背面达到负的最大偏角. 过了这个点, 在几个  $H$  的下游, 风向着来流攻角的方向回转. 继续回转直到超过了来流攻角方向, 风更加平行于防护林. 在  $(2\sim 12)H$  的距离内产生最大偏转. 在更下游处, 风再缓慢回转到来流角度.

当地风向 2 次偏转通过未扰来流方向, 2 个 0 偏转点分别发生在防护林正前方和近背风面处. 风向变化由这两点可分为 3 个区. 我们定义风向角大于未扰流攻角的迎风区为 F(front) 区, 后面偏斜较小 (小于上游未扰流攻角) 的区域为 B(behind) 区. 在 B 区下游, 风向更趋于平行于防护林 (大于上游未扰流攻角) 的区域为 W(wake) 区.

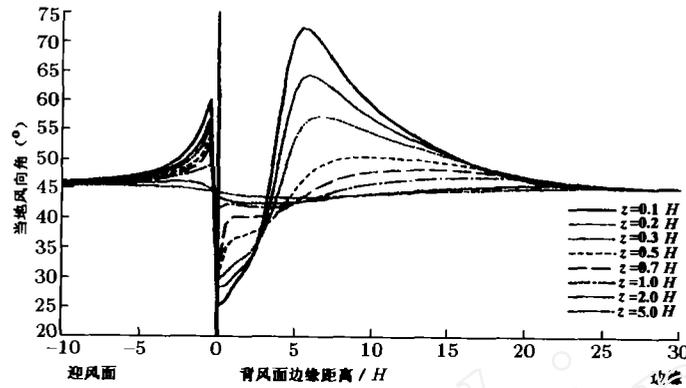


图 4 风向角在防护林方向的分布

Nord<sup>[70]</sup> 发表了防护林对风向影响的定量测量结果. 用装有 Gill 轻型扇叶的三分量风速风向仪, 在瑞典南部在西北西南东 (WNWSE) 风中性稳定条件下, 对一个多排防护林带进行风向测量. 测量高度为 2m, 各测量点形成一线, 该线垂直于防护林带. 这个林带由白桦树和云杉形成, 平均高度 12m, 长 100m, 宽 20m. 林带的孔隙度随高度而变. 孔隙度通过风洞模型和全尺寸林地的水平方向风速剖面确定为上部 0.55, 下部 0.23. 斜向流的阻力总是与当地流向相反, 而所形成的扰动压力梯度 (还有压力) 总是垂直于林带. 这个压力使障碍物上游的斜向流向着平行于障碍物的方向偏转. 当气流束进入林带, 阻力使风速减小, 但不会改变其方向. 然而, 林带内部垂直于障碍物, 而与流速成夹角的强压力梯度使林内流动朝更加与障碍物垂直的方向偏转<sup>[19]</sup>. 出了林带, 气流束进入背风区压力平台, 由于垂直向下的对流, 气流方向朝未扰来流攻角方向偏转. 但此后气流碰到一个弱的负压, 使其方向又稍微向平行于障碍物的方向偏转. 过了这个点, 气流又逐渐恢复到上游未扰流的方向.

## 7 防护林对偏斜风的遮蔽效率

已有几篇论文报道了偏斜风遮蔽效应变化的观测情况. Lawrence<sup>[71]</sup> 观察到, 由风速衰减 20% 所经过的距离来表示的遮蔽效果, 当来流攻角  $IA$  (由垂直方向算起) 为  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$  时, 分别减小 5%, 5%~15%, 40%~50% 和 60%~70%. Seginer<sup>[72]</sup> 也发表了斜向流对遮蔽距离的减小情况. 然而 Karschon 等<sup>[73~75]</sup> 报道说, 当风向的改变不超过  $25^\circ$ ~ $50^\circ$  时, 遮蔽距离不受影响. 另外, Gorsenin<sup>[76]</sup> 的文章说, 斜流对遮蔽距离的减小量小于  $\cos(IA)$ , 但 Seginer<sup>[72]</sup> 观测到的减小量大于  $\cos(IA)$ .

### 7.1 斜流风速的减小

与垂直来流相比, 有 3 个因素使斜向流在背风面风速衰减方面有不同的效应:

(a) 斜向流通过防护林所走的路程较长, 总阻力增大

(b) 平行于防护林的风速分量的有效衰减小于垂直方向 (防护林对压力的扰动仅影响法向速度分量)

(c) 如上节所述, 随流动恢复到未扰流状态, 风矢量发生偏转.

前 2 个因素在风速衰减方面的作用是相反的, 较大的来流攻角  $IA$  产生较大的阻力, 从而产生较大的风速衰减, 同时较大的攻角其平行于防护林方向的风速分量较大, 而该分量的衰减较小, 从而抑制了总的风速的衰减. 对于低密度林带, 前一因素更为重要, 导致风速最大衰减的增大. 然而对高密度林带, 后一因素更为重要, 导致风速最大衰减的减小.

### 7.2 斜流的遮蔽距离

以林带高度为单位, 遮蔽距离  $d$  定义为从林带到下游某处的距离, 在该处风速恢复到未扰流风速的 80%. 我们进一步定义垂直于防护林的来流的遮蔽距离为法向遮蔽距离  $d_0$ , 斜向流遮蔽距离称为有效斜向遮蔽距离  $d_{IA}$ . 图 5 给出了中密度林遮蔽距离的变化情况. 对中密度林, 当高度低于  $0.5H$  时, 模拟的法向遮蔽距离  $d_0$ , 在  $(15.5\sim 19.5)H$  之间, 这与现有的所有观测结果一致<sup>[1,3,4]</sup>. 遮蔽距离随林高和来流攻角  $IA$  的增大而减少. 遮蔽距离对  $IA$  的衰减率随林带高度而减少. 遮蔽距离几乎不改变  $IA$  角的范围, 从高度  $z=0.1H$  时的  $10^\circ$  到  $z=1.0H$  时的  $60^\circ$ . 因此在不同高度水平上的观测可导致关于斜向流对遮蔽距离影响的不同结论. 这可以解释观测研究中出现的一些明显矛盾结果的原因.

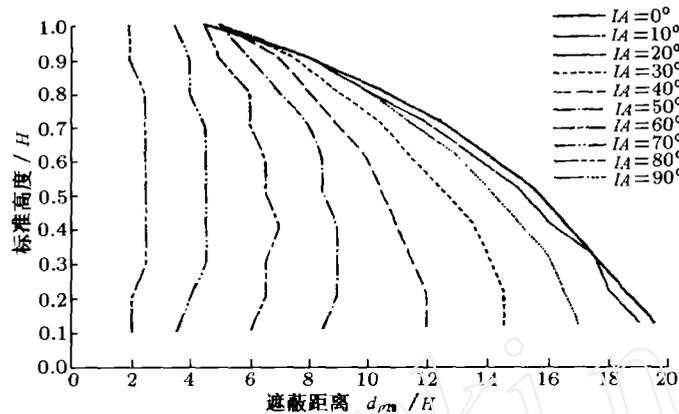


图5 在斜向流中遮蔽距离的变化

如果法向遮蔽距离的知识可以推广到斜向流中, 将会很方便. 然而, 我们只有作如下假定才能导出  $d_0$  与  $d_{IA}$  的简单关系: (a) 防护林不影响水平风的风向; (b) 防护林有效密度不随风向角  $IA$  而变, 且进一步假定; (c) 防护林在风速衰减方面对平行与垂直于防护林的风具有同样的效率, 即

$$\frac{\delta U}{U_0} = \frac{\delta u_1}{u_{10}} = \frac{\delta u_2}{u_{20}}$$

这里  $\delta$  表示风速及其分量的衰减量, 下标 0 表示上游未受扰风速. 我们可以将攻角为  $IA$  的斜向流的遮蔽距离沿防护林法向投影, 得到关系

$$d_{IA} = d_0 \cos(IA) \quad (15)$$

反之, 如果我们假定, (d) 防护林仅对垂直于林带的风速分量有衰减作用, 不影响平行分量, 即总的风速衰减等于法向分量的风速衰减, 则总风速的相对衰减为

$$\delta U/U_0 = \delta u_1/U_0$$

在假定 (d) 之下, 当地风向是变化的, 但如果我们仍假定防护林不影响水平风的风向, 有

$$\delta U/U_0 = \cos(IA)\delta u_1/u_{10}$$

将攻角为  $IA$  的斜向流遮蔽距离在防护林法线方向上投影, 得

$$d_{IA} = d_0 \cos^2(IA) \quad (16)$$

显然, 以上所有假定都不现实, 但这些函数关系有助于我们对结果的分析.

## 8 防护林形状的影响

防护林结构包括内部结构(孔隙度)与外部结构(形状). 大量防护林孔隙度的研究得到的结论是, 中

密度林在其产生影响的整个距离内使风具有最大的平均风速衰减, 航空工程中关于物体形状对流动影响的研究表明, 光滑形状或流线型物体对扰动压和流场明显具有较小的影响<sup>[53]</sup>. 大多数研究者认为, 光滑形状或流线体比有垂直边缘的防护林所产生的风速衰减小, 因为光滑体或流线体的阻力较小<sup>[77~79]</sup>. 然而 Woodruff 等<sup>[80,81]</sup> 报道说, 根据他们的风洞实验结果, 形状很不相同的防护林所产生的风速衰减差别很小. 他们研究了很多流线形状, 但不幸的是, 现在普遍认为具有最大风速衰减的矩形体, 不包括在内.

Wang & Takle<sup>[28]</sup> 对 7 种常见防护林形状的影响作了数值模拟, 并将其分为三种形状类型: 矩形, 三角形和流线型, 我们分别用 H, A 和 S 来表示. 三角形和流线型可进一步划分. 我们用字母 J 表示障碍物背风面是垂直的, 其镜像, 即迎风面为垂直的用 L 表示. H 代表两面都是垂直的, A 代表前后两边有对称的斜面. 分别考虑总体形状(第一特征)和迎风与背风面的对称性(第二特征), 我们得到 7 种形状: HH, AA, AL, AJ, SA, SL 和 SJ.

我们惊奇地发现, 虽然防护林形状很不相同, 各不同形状的阻力也相差很大<sup>[28]</sup>, 但在风速衰减方面它们之间的差别却很小, 即使最大风速衰减区, 也相差很小. 在所实验的形状范围内, 防护林形状对遮蔽距离的影响可以忽略. 迎风面为垂直的防护林在较低高度上产生的风速衰减最大. 而在较高高度, 形状 HH 的衰减最大. 在树冠上方, AL 产生最大, AJ 产生最小的风速升高. 防护林形状对其周围的扰动压力产生很大影响(图 6). 随着空气靠近林带, 压力上升, AL 形产生最快的压力升高, 而光滑形状产生较小的压力扰动.

压力损失系数, 或阻力系数  $C_p$ , 常被用于代表障碍物的气动特性, 其定义为绕过障碍物的平均压降除

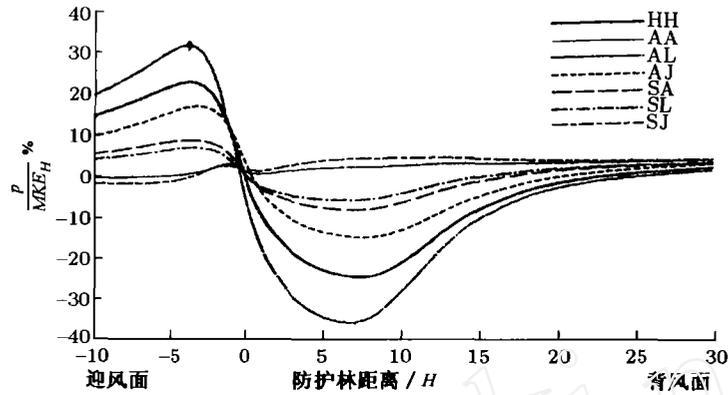


图6 防护林形状对周围扰动压力的影响

以障碍物顶端高度处未受扰来流的动压或  $MKE^{[53]}$ 。压力损失系数强烈依赖于障碍物形状。迎风面垂直的三角形林带的  $C_p$  比光滑形状林带大 33%<sup>[28]</sup>。我们的计算结果与 Hoerner<sup>[53]</sup> 文章中的固体障碍物空气动力测量结果一致。这些结果为：对固体形状 AA, AJ, AL, HH 和 SA, 分别有  $C_p=1.0, 1.03, 1.28, 1.2$  和 0.8。同过去很多研究者一样, 根据压力损失系数, 我们似乎有理由作如下推论: 防护林形状将对遮蔽效果产生很大影响。光滑形状或流线型防护林将大大降低遮蔽效果。然而, 我们的数值模拟和 Woodruff & Zigg<sup>[80]</sup> 的测量结果 (见文 [1] 的综述) 表明, 遮蔽效果受防护林形状的影响很小。下面对不同形状防护林的动量收支分析将澄清这个明显的矛盾。

## 9 动量收支与遮蔽机理

Plate<sup>[6]</sup> 对防护林空气动力学的几个定性方面作了考察。防护林对气流的阻力将从空气中吸取能量。遮蔽效率不仅由总阻力, 而且也由阻力引起的整个遮蔽区动量亏损分布情况决定。中近尾流区的动量亏损分布直接决定了林带的效率。Kaiser<sup>[5]</sup> 假定遮蔽区动量的损失由守恒的被动标量扩散来补偿, 获得了一个风速分布的误差函数公式。与单种流体边界层一样, 风速剖面形状由剪切力梯度决定。根据这个理论, 恢复到未扰流状态与动量亏损的消除, 只能通过湍流过程来完成: 较强的湍流导致流动较快地恢复到未受扰背景流动状态。这个理论有点过于简单化了, 但它常被用来理解和解释实验数据。Naegeli<sup>[82]</sup> 现场测得的风速亏损剖面表明, 中密度林带具有最大的遮蔽效率<sup>[1,4,6]</sup>。这可作如下解释: 虽然稠密林带有较大的阻力, 可在林带背风面产生直接的较大动量亏损, 但它同时也产生较大的湍流脉动, 可增强向下游的动量扩散, 使流动较快地恢复到未扰流风速。然

而, 在大气<sup>[83]</sup> 和风洞中<sup>[60,79]</sup> 对稠密格栅和固体墙的测量结果表明, 其遮蔽距离只是比中密度格栅稍微短了一点, 其差别远小于 Naegeli<sup>[82]</sup> 提供的数据。

Wilson<sup>[42]</sup> 的数值模拟结果为, 遮蔽距离随林带密度的增大而增大。对遮蔽效应根本原因的评估需要计算湍流脉动压力梯度和对流在不同的背风区对风速恢复过程的相对贡献。以往模拟研究不能准确描述防护林所吸收动量, 阻碍了动量收支的深入分析。Wang & Takle<sup>[29]</sup> 发表了防护林流动的动量收支情况分析, 并记录了每一项对恢复过程的贡献。这些结果不仅具有理论意义, 它们还可应用于设计新型防护林及解释实验数据。

防护林通过阻力的形式从风场中吸取能量, 因此, 较大的阻力将在不可压大气边界层中引起较大的风速亏损。然而防护林的最好效果并不意味着将风速减为零, 其目的是在靠近地面的薄边界层内, 作物需要保护的地方, 有最长距离的最优风速衰减 (即减小到低于危险风速)。做到最优风速衰减, 需要理解防护林阻力引起的动量亏损是如何在下游得到补偿的, 及受扰风速是如何恢复到未扰前状态的。有人建议, 认为防护林密度是决定遮蔽距离的最重要因素<sup>[1,4]</sup>。下面我们先分析阻力随防护林密度的变化情况及所导致的风速衰减, 然后分析背风面风速恢复的各个过程及在不同位置估计它们的相对大小。

### 9.1 阻力与风速衰减

一般人们的观念认为, 一个稠密林带, 较之稀疏林带可产生较大风速衰减的同时, 其恢复到未扰前状态的速度也较快。结果最优林带密度为 40% ~ 50%<sup>[1,4]</sup>, 此时有最长的遮蔽距离。我们在图 7 中给出了模拟的, 用未扰流风速归一化了的风速衰减结果。有几点值得注意:

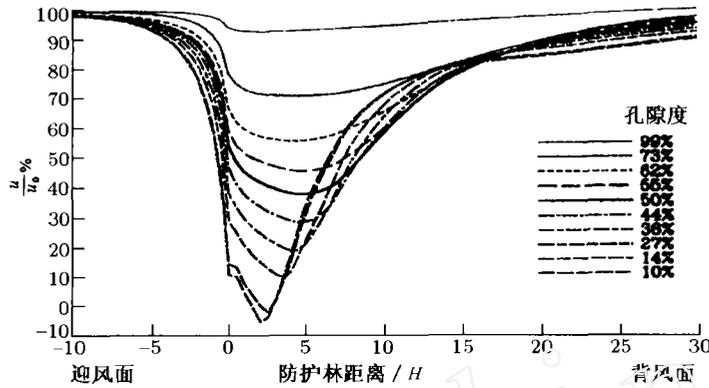


图 7 不同密度防护林的风速衰减

(1) 最大风速衰减发生于  $z = 0.5H$  距背风面  $(1\sim 5)H$  处, 而不是紧靠背风面处. 最大风速衰减的位置随防护林密度增加而向林带靠近, 但这种特征在稀疏林带中不明显. 因为稀疏林带的“衰减谷”较宽, 而稠密林带较深.

(2) 最大风速衰减随林带密度  $K_r$  的增大而增大, 但下游风速衰减并不随之而增大.

(3) 除非常稀疏林带的 ( $K_r=0.1$ , 按照 Hoerner<sup>[53]</sup> 的公式, 相当于 92% 孔隙度) 风速衰减很小外, 稠密林和稀疏林的风速衰减曲线相互交叉.

对于稠密林带, 风速在近背风区内,  $(0\sim 10)H$ , 恢复较快, 而在中区  $(10\sim 30)H$ , 却比稀疏林更慢. 因此,  $K_r=2.0$ (相当于 50% 孔隙度) 的林带, 速度  $u/u_0$  为 50%~80% 的区域范围最大. 遮蔽距离定义为林带下游风速至少衰减 20% 的距离范围<sup>[1,4]</sup>. 50% 孔隙度 ( $K_r=2.0$ ) 的林带, 最大遮蔽距离为  $16.5H$ , 当孔隙度减小到 10% ( $K_r=100$ ) 时, 遮蔽距离稍微减小为  $14.5H$ .

在以前的研究报告<sup>[1,4]</sup>中有一种猜测, 即动量亏损的平流 - 湍流脉动扩散过程效应. 但简单的平流 - 湍流脉动扩散过程不能决定最大风速衰减的位置. 另外 Wilson<sup>[42]</sup> 认为, 在障碍物附近产生的湍流动能尺度较小, 对动量运输和快速耗散贡献很小. 动量交换收支分析<sup>[29]</sup> 可帮助我们理解遮蔽机制和动力学过程.

## 9.2 动量收支分析

对于林带外部定常流动, 方程 (10) 变为

$$-u \frac{\partial u}{\partial x} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \overline{u^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

I          II          III          IV          V

前两项 (I 和 II) 分别为平均水平动量的水平和

垂直平流输运, 中间两项 (III 和 IV) 分别为水平动量的水平和垂直湍流输运, 最后一项 (V) 为压力梯度. 有效遮蔽区 (即风速至少衰减 20% 的区域) 位于林带背风面  $30H$  以内的中近距离内. 中密度林 ( $K_r=2.0$ , 相当于孔隙度为 50%) 在背风区  $30H$  以内各高度处, 水平方向动量方程各项之间的相对关系如图 8 所示. 各值用林高  $H$  和林带上端高度处未扰流平均动能  $MKE_H$  的组合  $MKE_H/H$  加以归一化, 因而给出的是无量纲加速度分布. 如果某项为正, 则它对风速恢复到未扰前的背景风速平衡有贡献, 而为负的项则使平均风速衰减.

在相当于林带半高位置上各动量收支项的分析 (图 8) 给出如下几点结论<sup>[28,29]</sup>:

(1) 下风方向  $(0\sim 5)H$  距离内水平平均输运 (水平平流) 为正, 且立即在紧贴林带背面处达到最大值, 在最大风速衰减处 ( $x=5H$ ) 趋于 0, 而在  $x=10H$  处进一步减小到最小值.

(2) 垂直平均输运 (垂直平流) 在背风面  $(0\sim 7)H$  距离内为负, 超过  $7H$  后为正, 在  $x=11H$  处达到最大值, 因而几乎补偿整个背风区的水平平均输运.

(3) 垂直湍流输运被认为是风速场恢复的决定性因素<sup>[1,4]</sup>, 然而图 8 显示出其它过程可以和垂直湍流输运同样重要.

(4) 水平湍流输运很小, 除了较高高度处其它项也很小外, 可以将其忽略.

(5) 压力梯度在背风面有两个极小点, 一个是紧贴林带, 另一个在下游  $10H$  处. 下游超过  $17.5H$ , 压力梯度有一个小的正值, 这显示出在背风中区压力梯度的重要性, 这与以前普遍认为的压力梯度只在近区扮演重要角色形成鲜明对照<sup>[42]</sup>. 然而正如 Plate<sup>[6]</sup> 所总结的那样, 动量输运在背风面近区 ( $(0\sim 2)H$  以内) 和在中区 ( $(7\sim 20)H$ ) 都非常大. 水平平流和大的负

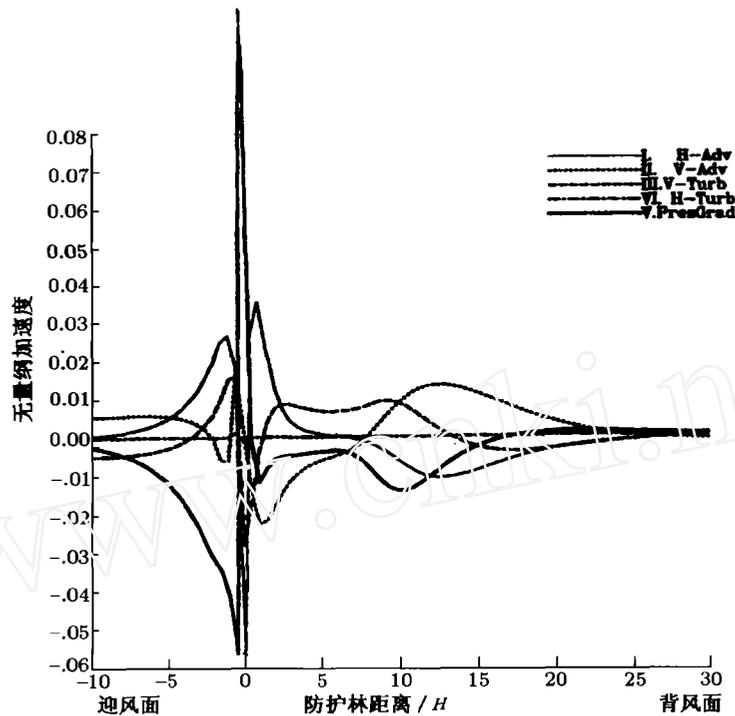


图 8 通过防护林的流的动量收支

压梯度相结合,使风速衰减区在背风面的延伸远比迎风面大.在背风面中区((9~23) $H$ )垂直对流在帮助风速恢复方面是比湍流输运更重要的因素.

这些模拟澄清了各不同位置处对风速恢复有贡献的各个过程所扮演的角色.很清楚,扰动压、湍流和垂直速度在风速恢复方面都是重要角色.

Wang & Takle<sup>[29]</sup>也分析了垂直方向动量收支情况,指出地面与自由流的压差产生一种垂直力,使流动趋向于地面,在地面附近形成流线(Coanda效应).对中密度林,Coanda效应很弱,只局限在背风区(1~10) $H$ 处.而在中区(10~30) $H$ 遇到垂直压力梯度,使垂直速度降为0.对于稠密林带,水平和垂直对流及垂直湍流输运都是重要角色.甚至在稀疏林和中密度林中总被忽略的水平湍流输运,也对动量收支有很大影响.环流和相应的强湍流使垂直动量收支出现多峰值.

## 10 蒸散影响及表面能量分配

灌溉用水通常占整个农业用水量的80%~85%,其用水效率估计为10%~40%.因此,水愈来愈成为影响粮食生产的最关键因素.水对作物生产的限制比任何其它因素的限制更常见,因此有必要提高作物的用水效率,以增加作物产量<sup>[84]</sup>.农林管理(agroforestry)已经被视为一种保护森林资源、增加农业产

量和减少森林砍伐的可能措施<sup>[85]</sup>.树木在农村中还有其它好处,如可贮存碳、是一种潜在的生物能源作物,因而对农林的管理实践将会得到加强.

减少土壤水分蒸发和植物蒸腾在干热和湿冷期都对林带有利<sup>[86]</sup>.保持土壤水分可能是促进植物生长、增加作物产量的重要因素.根据Pan & Piche蒸发测量仪测量的结果,在防护林背风面可减少蒸发10%~40%<sup>[87,88]</sup>.Miller等<sup>[89]</sup>报导说,在6天的测量中,遮蔽作用可使蒸腾平均减少20%.在中国进行的大尺度防护林网的观测表明,区域内蒸发可减少14%.防护林已被视为一种现实的措施,用以增加防护区作物的水分利用效率<sup>[90]</sup>的一种切实可行的措施.但Marshall<sup>[91]</sup>注意到几个例外,并提供数据显示林带季节性蒸散增大的情况.Dixon & Grace<sup>[92]</sup>揭示了蒸发率随风速的减小而增大的规律.Brenner等<sup>[93]</sup>最近的工作也不支持林带背后水份保持的假说.Cleugh<sup>[94]</sup>考察了林带对微气候影响的观测结果,指出模型研究的价值及将模型推广到包括温度、湿度和CO<sub>2</sub>影响的必要性.

虽然这个问题很重要已被众多作者所考虑,但大部分测量使用汽化计和蒸发仪,且局限于估计蒸发能力.而植物可以关闭其气孔以减少蒸发,因此我们必须区分林带对可能蒸发和蒸散影响的不同.

林带对蒸发的影响由于障碍物产生的湍流、孔隙

度及蒸发现场水分情况等因素而变得复杂. 林带对水分的利用有几种可能的结果, 难以预测, 在水资源有限的环境中不一定总是有利于作物生长. 因此了解蒸散对林带影响的响应是必要的. Wang 等<sup>[29,32,34]</sup>将前面提到的湍流流动模型推广到驱动土壤-植被-大气系统的过程中

$$\text{通量} = \frac{\text{势差}}{\text{阻力}} \quad (18)$$

各种阻力参照 Sellers 等<sup>[95]</sup>的工作进行定义, 并加以确定. 对于显热流  $H_s$ , 势差是叶面或地面与空气温差. 对于潜热流  $LE$ , 势差是叶面或地面与空气的蒸汽压差. 这些值与土壤水分含量相联系, 由土壤水分收支方程预测, 用实际土壤水份与饱和土壤水份的比值  $m$  来表示<sup>[35,96]</sup>. 林带模拟为一种流动的障碍物, 并不参与水汽和能量平衡. 模拟过程包括林带同蒸散、热流的影响及它们同土壤水分、林带结构及大气边界层、土壤和植被条件的关系.

### 10.1 蒸散与热流(土壤可用水分的函数)的时-空变化

对于非常干燥的土壤 ( $m=0.2$ ,  $m$  为土壤水分可用系数), 林带使显热流减少. 这个影响可延伸到下游距林带  $15H$  处, 热流的减少最多的位于  $x=6H$  处. 林带对显热流  $H_s$  的影响也随时间明显变化, 最大影响发生在  $t = 1300$  LST. 因此, 潜热流在遮蔽区增大, 最大增长在  $x = 6H$ ,  $t = 1100$  LST. 虽然干地面的蒸散量很小, 但潜热流  $LE$  在遮蔽区可达到非遮蔽区的 122%.

随着土壤湿度增大, 情况开始发生变化. 从  $m =$

0.3 起潜热流  $LE$  仍然增大 20%, 但  $LE$  的最大增长发生在  $t = 1300$  LST. 在  $t = 0900$  LST,  $LE$  的明显减少发生在下游 ( $0 \sim 17$ )  $H$  处, 在  $x = 6H$  处减少最多. 在  $t = 1700$  LST,  $LE$  在遮蔽区稍有减少.

$m = 0.3$  时, 遮蔽区显热流  $H_s$  在中午减少, 但在清早和下午增大.  $m = 0.4$  的情况类似, 但潜热流  $LE$  在中午增加很有限, 在早上和下午显著减少. 潜热流  $LE$  在  $t = 1000$  LST 和  $t = 1530$  LST 的减少至多分别为 18% 和 25%.

$m = 0.5$  (图 9) 时, 潜热流  $LE$  在中午不再增大, 在近背风区, 白天蒸散总量都是减少的, 而背风面中区 ( $15 \sim 23$ )  $H$ , 由于尾流的湍流脉动, 下午的  $LE$  增大. 相应地, 显热流  $H_s$  在遮蔽区增大; 这在  $m = 0.6$  时更加明显, 在中午前后一个大的热流中心形成于  $x = 6H$  处. 在  $t = (0900 \sim 1300)$  LST 期间, 蒸散总量进一步减少, 至多可减少 40%.  $m = 0.8$  时, 白天潜热流  $LE$  在延伸到下游  $25H$  的遮蔽区有明显减少, 最多可减少 50%, 发生在早晨, 位置在背风面 ( $4 \sim 7$ )  $H$  处, 此处风速衰减和湍流脉动都达到最大值<sup>[19]</sup>. 作为对比, 显热流  $H_s$  则不同, 在遮蔽区增大, 并形成中心. 土壤湿度再增大时, 情况几乎不变. 对于  $m=0.3, 0.5, 0.8$ , 最大蒸散量分别发生在  $t=0930, 1030, 1230$ . 当水份有限时, 作物气孔关闭. 对于干土, 作物气孔关闭要比中等湿度土壤关闭的早. 对于湿土, 气孔不关闭, 因而蒸散在最大辐射和最高温度时最大.

### 10.2 防护林结构对蒸散和热流的影响

防护林附近湍流脉动和流动结构强烈依赖于林

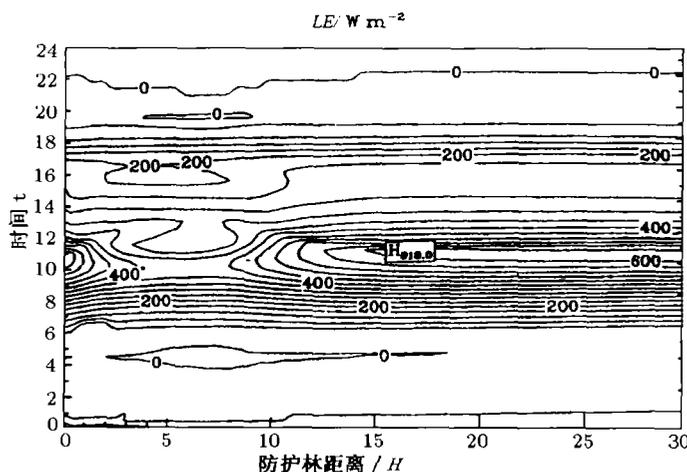


图 9 蒸散对防护林带的影响

带密度,中密度林带对风的遮蔽效果最佳 [13~22,25~29]。Wang 等 [31,35] 揭示了林带密度对林区蒸散的影响。非常密的林带在近背风区对  $LE$  和  $H_s$  都产生复杂变化,它们与环流和流动分离有关 [19]。在环流区,中午  $LE$  显著增大,在  $x=3H$  处形成中心,它抵消了由林带屏蔽引起的蒸散的减少。 $H_s$  在两个分别位于  $x=1.5H$  和  $x=5.5H$  的中心处得到增强。对非常稀疏的林带,  $LE$  仍可减少,但林带对  $H_s$  和  $LE$  的影响较小。

农业实践,如防护林网和杆状作物可以显著地影响蒸散。然而,这种影响不是直接的。我们的模拟显示了潜热流和显热流的复杂时空变化。气动遮蔽效应及其与土壤-植被-大气边界层系统中与能量、水份和质量的传递之间的相互作用,可以十分不同,它们在很大程度上由土壤中水分含量决定。这些模拟表明,土壤水份不仅控制蒸散总量,还控制蒸散-遮蔽效应的趋向:林带在湿土中可减少蒸散,在干土中则增大;对中等湿度土壤,在中午前后增大而在早上和下午减少。模拟还显示出,对很密的林带环流显著抵消蒸散的减少,而很稀疏的林带则对能量分配影响很小。因此中密度林也具有最大的蒸散和遮蔽效应。区域尺度的农业实践可显著影响水分和能量循环,可用其优点抑制气候变化带来的负面影响。

## 11 高性能计算机——并行与组群计算

高速计算机促进了新的科研方式的迅速发展。计算科学将理论科学和试验科学两大经典研究分支联系在一起。计算科学家在超级计算机上模拟非常复杂的现象。这些现象是无法用理论来可靠预测或因太危险或太昂贵不能在实验室中重现。由于微机的迅速发展和有高速切换功能的快速联网,分布式工作站网络并行处理技术成为一种成本低廉的高性能计算方法——组群计算。林带湍流流动模型系统已经在 128 处理器(工作站网络)组群上工作,它通过使用 MPI(信息流通界面)和 PVM(并行虚拟机)技术 [35,36]。将林带湍流模型并行化,并在运算中负荷平衡性能良好。

代码的计时需求分析表明,大多数时间不是花费在求解三角方程组上,而是花费在非线性项的求解和计算扰动压力上。对于一个稀疏林带,扰动压力的计算时间占总时间的 66%;而当林带密度很高时,扰

动压的计算时间占总时间的 91.4%。

### 11.1 功能分解并行计算机(FDPP)

功能并行计算是将任务或功能分配到不同处理器中同时执行,以达到更高的速度。时间步进迭代循环外的函数不值得用并行计算,因为它们在整个运行中仅执行一次运算,且需要处理大容量的数据。根处理器应具有所有功能,并在每个时间步长间转换,同时将 6 个其它功能分别放在 6 个不同的机器上。这些功能从前一个时间步取值,并在相同的时间步内独立运行。它们在每个时间步长都同时完成任务,从而在任何时间都是同步的,不同的功能用相同的前一时间步上的值作为输入。每个时间步完成运算时,处理器将新的计算值传送到所有其它处理器上,因而每个处理器可使用其他处理器计算出来的最新值。对 7 个节点的 6 路通讯时间占 CUP 时间的 97%,而对于平行代码,加速比小于 1。机时的主要部分用在计算动压扰动上。模型的每个变量的计算都需要其它变量的信息。因此有  $O(n^2)$  量级的信息通过。此外程序必须同时完成每个功能后进行同步,使其具有相同的初始点,以便所有功能接受相同时间步的值作为新的初值。压力计算很费时间,并使其它处理器闲置起来,等待着压力计算完成。所以,平均负荷平衡比仅为 51%。并行计算时间由最耗时的功能计算加通讯时间决定。FDPP 对于这种程序来说,显然不是一个好的策略。

### 11.2 区域分解并程序(DDPP)

区域分解相当于计算域的空间分解。区域尺度  $n \times n$  被分为  $m$  个小域,每个小域的尺度为  $n/m \times n$ 。给每个区域分配一个处理器,从而减少计算负荷,提高性能。但是,每个区域需要与其它的相邻区域交换信息,通讯负荷由于信息复杂度的增大 ( $O(2n)$ ) 而增加。所以使用区域分解也需权衡利弊,最终的性能取决于两个因素的相对效果。图 10 显示加速比随处理器个数和防护林模型区域尺度的变化。有方块的曲线是区域尺度为  $(128+2) \times (64+2)$  的情况,而有实心圆的曲线,其区域尺度为  $(256+2) \times (128+2)$ 。正如图中所示,加速比随处理器个数的增多而增大。对于少量的处理器,曲线接近于理想的直线,但随处理器个数的增多,曲线偏离理想直线,性能增益减慢,特别是小的区域尺度更慢。这是区域分解后,计算负荷减少,通讯负荷增大的权衡结果。当处理器个数很少或

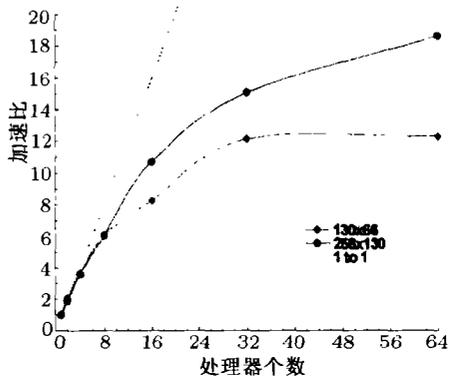


图 10 加速比随处理器个数和防护林模型区域尺度的变化

计算域很大时, 计算量的减少占主导地位, 而处理器数量很大时, 每个处理器仅处理几个网格点, 性能增益有限, 而通讯量的增大占主导地位. 我们用区域分解并行计算获得了很好的负荷平衡 ( $>0.9$ ). 对于更多的处理器, 平衡比改进很少.

## 12 总结及今后的应用

在模拟完整的相互作用的自然系统的植被、土壤和气候时, Takle & Kao<sup>[97]</sup> 描述了一个概念模型, 将许多不同空间尺度上的物理过程联系起来, 在模拟完整的相互作用的自然系统的植被、土壤和气候时, 用非中性大气边界层的非静力模型, 在一种植被内模拟局部动量吸收的能力, 为多种植物生态系统物理相互作用的模拟提供了必要的联系. 阻力的准确表达得到了植被障碍物内部及周围准确的压力场, 从而获得准确的平均和脉动流场. 对植物群中单株植物产生的湍流运动情况的理解能够定量确定这些相互作用中至关重要的对流效应. 推广到非中性流时, 由于障碍物对光线的截留而变得复杂. 但这对于模拟多种植物系统表面能量收支 (包括土壤和水分等) 的进展来说是次要的.

本文所述模拟技术的应用范围包括: 通过多种植被的粒子和被动标量的输运, 植被对粒子输运、杀虫剂运动、农业与工业废气的扩散, 汽化喷雾剂的漂移模式, 孢子和花粉的运动的影响等, 都能够更加精确地模拟. 植物授粉时, 花粉传递过程的模拟, 包括普通的或转基因物质的传递, 可以先于, 甚至取代费时并引起争议的现场试验. 在这些环境下, 如果基于横向和垂向平均和脉动输运知识, 使我们能够更精确地模拟不同种类的蒸发和作物蒸腾过程, 那么对农业水土保持技术就可用数值方法进行评估. 管理选择

策略的评估可通过调节农业、园艺或森林环境微气候来创造更加适合作物生长、提高收成的环境. 在两相系统中, 再现大压力梯度的能力提供了能够模拟像森林大火这样的强对流区的模型<sup>[98]</sup>.

全球气候变化对植物、动物和人类的影响是在局部尺度上, 而不是在区域或全球尺度感受到的. 可用区域气候模型<sup>[30]</sup> 将全球气候的动力学缩尺为区域尺度. 能够模拟非中性影响的微气象模型完成了这一过程, 并使全球变化的影响在局部农业、森林和自然生态系统中得到解释.

最后, 像本文提出的这类模型, 可适合于在新一代并行计算机上运行, 从而使人们对人工种植和天然的多种植物生态系统的认识取得更快进展.

**致谢** 美国农业部 (96361083892), 美国能源部 NIGEC(DE-FC0393ER61010), NRI 竞标 (93-37101-8954) 资助项目. 本项目在 ALICE 网络工作站完成, ALICE 计算机设备由 USDOE Ames 实验室维护.

## 参 考 文 献

- 1 van Eimern J, Karshon R, Razumova L A, Robertson G W. Windbreaks and shelterbelts. World Meteorol Organ Tech Note. 1964, 59: 188
- 2 Rosenberg N J. Windbreaks for reducing moisture stress. In: Barfield B J, Gerber J F, Joseph St, eds. Modification of Aerial Environment of Plants, Mich: ASAE. 1979. 538
- 3 McNaughton K G. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate. *Agric Ecosyst Environ*, 1988, 22-23: 17~39
- 4 Heisler G M, Dewalle D R. Effects of windbreak structure on wind flow. *Agric Ecosyst Environ*, 1988, 22-23: 41~69
- 5 Kaiser H. Die stromung an windschutzstreifen. *Ber Deut Wetterdienstes*, 1959, 7: 1~36
- 6 Plate E J. The aerodynamics of shelterbelts. *Agric Meteorol*, 1971, 8: 203~222
- 7 Wilson N R, Shaw R H. A higher order closure model for canopy flow. *J Appl Meteorol*, 1977, 16: 1197~1205
- 8 Raupach M R, Shaw R H. Averaging procedures for flow within vegetation canopies. *Boundary-Layer Meteorol*, 1982, 22: 79~90
- 9 Finnigan J J, Einaudi F. The interaction between an internal gravity wave and the planetary boundary layer. Part II. Effect of the wave on the turbulence structure. *Q J R Meteorol Soc*, 1981, 107: 807~832
- 10 Counihan J, Hunt J C R, Jackson P S. Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers. *J Fluid Mech*, 1974, 64: 529~563
- 11 Hagen L J, Skidmore E L, Miller P L, Kip J E. Simulation of effect of wind barriers on airflow. *Trans ASAE*, 1981, 24: 1002~1008
- 12 Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: technical description and user's guide. NCAR Tech. Note NCAR-TN-417+STR. Natl Cent Atmos Res, Boulder, CO, 1996. 150

- 13 Wang H, Shen J. A two-dimensional numerical study of the wind sheltering effects of shelterbelts. *Acta Meteorologica Sin*, 1989, 3: 498~505
- 14 Wang H. A numerical simulation of the wind sheltering effects of multiple parallel shelterbelts. *J Nanjing Univ*, 1991, 36: 481~488
- 15 Wang H. The effects of shelterbelts on the atmospheric turbulent exchange coefficient. *Acta Geogr Sin*, 1991, 46: 107~114
- 16 Wang H. On methods for the study about the protection effects of shelterbelts. In: East China Agric Assoc, ed. Promoting Agriculture Through the Progress of Science and Technology. Jiangsu: Jiangsu Sci & Technol, 1992. 369~372
- 17 Wang H, Takle E S. Interaction of synoptic flow and mesoscale circulation as a function of synoptic wind speed. In: Conf Mesoscale Process 6th, Portland. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1994. J36~J39
- 18 Wang H, Takle E S. Mesoscale and boundary-layer flows over inhomogeneous surfaces consisting of porous obstacles. In: Conf Mesoscale Process 6th, Portland. Boston, Mass: Am. Meteorol. Soc., 1994. 262~265
- 19 Wang H, Takle E S. A numerical simulation of boundary-layer flows near shelterbelts. *Boundary-Layer meteorol*, 1995, 75: 141~173
- 20 Wang H, Takle E S. Boundary-layer flow and turbulence near porous obstacles. I. Derivation of a general equation set for a porous medium. *Boundary-layer Meteorol*, 1995, 74: 73~88
- 21 Wang H, Takle E S. Equations for mean and turbulent flow through and over porous obstacles. In: Symp Boundary-layers Turbul 11th, Charlotte. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1995. 109~110
- 22 Wang H, Takle E S. Simulations of mean and turbulent properties of oblique flows near agricultural shelterbelts. In: Symp Boundary-Layers Turbul 11th Charlotte. Boston, Mass: Am Meteor Soc, 1995. 261~264
- 23 Wang H, Takle E S. Influences of shelterbelts on turbulent flow and shelter mechanism. In: Conf Agric For Meteorol Symp Fire For Meteorol, 22nd, Atlanta, GA, 1996-01-28~02-02. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1996. 108~112
- 24 Wang H, Takle E S. Modeling the evapotranspiration and energy partition of inhomogeneous agroecosystems. In: Conf Agric For Meteorolo, 22nd Atlanta, GA. Boston, Mass: Am. Meteorol. Soc., 1996. 362~365
- 25 Wang H, Takle E S. Numerical simulations of shelterbelt effects on wind direction. *J Appl Meteorol*, 1996, 34: 2206~2219
- 26 Wang H, Takle E S. On shelter efficiency of shelterbelts in oblique wind. *Agric For Meteorol*, 1996, 81: 95~117
- 27 Wang H, Takle E S. On three-dimensionality of shelterbelt structure and its influences on shelter effects. *Boundary-layer Meteorol*, 1996, 79: 83~105
- 28 Wang H, Takle E S. Model-simulated influences of shelterbelt shape on windsheltering efficiency. *J Appl Meteorol*, 1997, 36: 695~704
- 29 Wang H, Takle E S. Momentum budget and shelter mechanism of boundary-layer flow near a shelterbelt. *Boundary-Layer Meteorol*, 1997, 82: 417~435
- 30 Wang H, Shen J, Takle E S. Highresolution regional climate simulations using RegCM2 with different scale couplings of soil, vegetation, and atmospheric boundary-layer processes. In: Symp Boundary Layers Turbul 12th, Vancouver. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1997. 573~574
- 31 Wang H, Shen J, Takle E S. Influences of agroforestry ecosystem on evapotranspiration and soil moisture. In: Conf Hydrology, 13th Long Beach, CA, 1997-02-02-07. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1997. 360~361
- 32 Wang H, Takle E S, Shen J. Radiative characteristics of an agroforestry ecosystem. In: Conf Atmos Radiation 9th Long Beach, CA. 1997-02-02-07. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1997. 308~309
- 33 Wang H, Takle E S. Agricultural shelterbelts protection functions. In: ASAE Annu Int Meet Orlando FL. St Joseph, Mich: ASAE, 1998. 36
- 34 Wang H, Takle E S. Agroforestry shelterbelts and its influence on evapotranspiration. In: ASAE Annu int Meet Orlando FL. St Joseph, Mich: ASAE, 1998. 24
- 35 Wang H, Prabhu G M, Takle E S. Parallelization a very-high-resolution climate model using clusters of workstations with FVM and performance and load balance analysis. In: Proc Int Conf Parallel Distrib Process Tech Appl (PDPTA'98), Las Vegas, NV. CSREA Press, 1998, 1: 1762~1765
- 36 Wang H, Prabhu G M, Takle E S, Todi R. Implementation and performance evaluation for a computation-intensive climate simulation application. In: Proc Int Conf Parallel Comput (parco99), Delft Neth. London, UK: Imp. Coll, 1999. 1~8
- 37 Finnigan J J. Turbulent transport in flexible plant canopies. In: Hutchison B A, Hicks B B, eds. The Forest-Atmosphere Interaction. Dordrecht/Boston/Lancaster: D Reidel, 1985. 443~480
- 38 Raupach M R, Coppin P A, Legg B J. Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy. Part I: the turbulence structure. *Boundary-Layer Meteorol*, 1986, 35: 21~52
- 39 Whitaker S. The transport equations for multi-phase system. *Chem Eng Sci*, 1973, 28: 139~147
- 40 Zhu T, ed. The Study of Ecological Effects and Physical Characteristics in the Boundary-Layer of Protective Forest System. Beijing, China: Meteorol, 1992. 1~266
- 41 Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities. In: Vegetation and the Atmosphere. Burlington, Mass: Academic, 1975, 1: 1~278
- 42 Wilson J D. Numerical studies of flow through a windbreak. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1985, 21: 119~154
- 43 Yamada T. A numerical model study of turbulent airflow in and above a forest canopy. *J Meteorol Soc Jpn*, 1982, 60: 438~454
- 44 Meyers T, Paw U K T. Testing of a higherorder closure model for modeling airflow within and above plant canopies. *Boundary-Layer Meteorol*, 1986, 37: 297~311
- 45 Naot O, Mahrer Y. Two-dimensional microclimate distribution within and above a crop canopy in an arid environment: modeling and observational studies. *Boundary-Layer Meteorol*, 1991, 56: 223~244
- 46 Li Z, Lin J D, Miller D R. Air flow over and through a forest edge: a steady-state numerical simulation. *Boundary-Layer Meteorol*, 1989, 46: 333~354
- 47 Miller D R, Lin J D, Lu Z N. Air flow across an alpine forest clearing: a model and field measurements. *Agric For Meteorol*, 1991, 56: 209~225
- 48 Mellor G L, Yamada T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 1791~1806
- 49 Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems. *Rev Geophys Space Sci*, 1982, 20: 851~875

- 50 Yamada T, Mellor G L. A simulation of the wangaara atmospheric boundary layer data. *J Atmos Sci*, 1975, 32: 2309~2329
- 51 Paegle J, Zdunkowski W G, Welch R M. Implicit differencing of predictive equations of the boundary layer. *Mon Weather Rev*, 1976, 104: 1321~1324
- 52 Chorin A J. Numerical solution of the Navier-Stokes equations. *Math Comput*, 1968, 23: 341~354
- 53 Hoerner S F. Fluid Dynamic Drag. Libr Congr. Catalog Card No. 64-19666, 1965
- 54 Baines W D, Peterson E G. An investigation of flow through screens. *Trans Am Soc Mech Eng*, 1951, 73: 467~480
- 55 Richards P J, Kay E F, Russell D, Wilson G R C. Porous artificial windbreaks in oblique winds. In: IPENZ Conf Hastings NZ. 1984, 10: 67~84
- 56 Perera M D A S. Shelter behind two-dimensional solid and porous fences. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1981, 8: 93~104
- 57 Castro I P. Wake characteristics of two-dimensional perforated plates normal to an airstream. *J Fluid Mech*, 1971, 46: 599~609
- 58 Takle E S, Wang H, Schmidt R A, Brandle J R, Litvina I V, Jairell R L. Pressure perturbations around shelterbelts: Measurements and model results. In: Symp Boundary Layers Turbul 12th Vancouver. Boston, Mass: Am Meteorol Soc, 1997. 563~564
- 59 Takle ES, Wang H, Brandle J R, et al. Numerical simulations and measurements of effects of wind direction and shelter structure on shelterbelt efficiency. In: Conf Agrofor N Am 6th, Hot Springs AK, 1999. 36~40
- 60 Raine J K, Stevenson D C. Wind protection by model fences in a simulated atmospheric boundary layer. *J Ind Aerodyn*, 1977, 2: 159~180
- 61 Ogawa Y, Diosey P G. Surface roughness and thermal stratification effects on the flow behind a two-dimensional fence: II. A wind tunnel study and similarity considerations. *Atmos Environ*, 1980, 14: 1309~1320
- 62 Bradley E F, Mulhearn P J. Development of velocity and shear stress distributions in the wake of a porous shelter fence. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1983, 15: 145~156
- 63 Jacobs A F G. The flow around a thin closed fence. *Boundary-Layer Meteorol*, 1984, 28: 317~328
- 64 Sturrock J W. Aerodynamics studies of shelterbelts in Nealand-1: low to medium height shelterbelts in Mid-Canterbury. *N Z J Sci*, 1969, 12: 754~776
- 65 Sturrock J W. Aerodynamics studies of shelterbelts in Nealand-2: medium height to tall shelterbelts in Mid-Canterbury. *N Z J Sci*, 1972, 15: 113~140
- 66 Naegeli W. The braking effect of the wind by a large forest. A contribution to the problem of the width of shelterbelts. In: Ber 11, Kongr Int Union For Forsch Rome Firenze, 1954
- 67 Takahashi H. Wind tunnel test on the effect of width of windbreaks on the wind speed distribution in leeward. *J Agric Meteorol*, 1978, 33: 183~187
- 68 Taylor P A. Turbulent wakes in the atmospheric boundary layer. In: Steffen W L, Denmead O T, eds. Flow and Transport in the Natural Environment: Advances and Applications, Berlin: Springer-Verlag, 1988. 270~290
- 69 Brinmann K, Kaiser H. Maize strips as windbreaks, meteorological investigations and yield. *Z Acker Pflanzenbau*, 1955, 99: 321~334
- 70 Nord M. Shelter effects of vegetation belts-results of field measurements. *Boundary-Layer Meteorol*, 1991, 54: 363~385
- 71 Lawrence E N. Effects of a windbreak on the speed and direction of wind. *Meteorol Mag*, 1955, 84: 244~251
- 72 Seginer I. Flow around a windbreak in oblique wind. *Boundary-Layer Meteorol*, 1975, 9: 133~141
- 73 Karschon R. Les eucalyptus et la protection des cultures agricoles. In: Final Rep World Eucalypt Conf Rome, 1956. 63
- 74 Karschon R, Heth D. Wind speed, wind-borne salt and agricultural crops as affected by windbreaks. *Lay-Yaaran*, 1958, 8: 8~13, 38~42
- 75 Franken E, Kaps E. Investigations on shelterbelts in the Emsland. *Per Dtsch Wetterdienstes*, 1957, 5: 33~37
- 76 Goksenin N M. Principles of planting forest shelterbelts on arable slopes. *Nauenyi otchet vniaini Sel'hozgiz*, 1946. 1~6
- 77 Caborn J M. Shelterbelts and microclimate. *For Comm Bull (Edinburgh)*, 1957, 29: 129
- 78 Caborn J M. Shelterbelts and Windbreaks. London, UK: Faber & Faber, 1965. 288
- 79 Jensen M. The aerodynamics of shelter. In: FAO Report on the FAO-DANIDA Interregional Training Center on Heathland and Sand Dune Afforestation. FAO-DEN-TF, 1974. 123
- 80 Woodruff N P, Zingg A W. Wind tunnel studies of shelterbelt models. *J For*, 1953, 53: 173~178
- 81 Woodruff N P, Read R A, Chepil W S. Influence of a field windbreak on summer wind movement and air temperature. *Kansas Agric Exp Stn Tech Bull*, 1959, 100: 24
- 82 Naegli W. Further investigation of the wind conditions in the range of shelterbelts. *Mitt Schweiz Anst Forstl Veisuchswes*, 1946, 24: 660~737
- 83 Hagen L J, Skidmore E L. Turbulent velocity fluctuations and vertical flow as affected by windbreak porosity. *Trans ASAE*, 1971. 634~637
- 84 Sturrock J W. Shelter and its management and promotion. *Agric Ecosyst Environ*, 1988, 22-23: 17~39
- 85 van Maydell H J. Agroforestry in the dry zones of Africa: past, present and future. In: Steppler H A, Nair P K R, eds. Agroforestry, a Decade of Development. Nairobi: ICRAF, 1987. 89~116
- 86 Gagarin E. Planting trees for protecting fields in Russia. *Forstwiss Centralbl*, 1949, 68: 571~602
- 87 Bates C G. Windbreaks: their influence and value. *Bull For Serv*, US Dep Agric, 1911. 1~22
- 88 Long S P, Persaud N. Influence of neem (*Azadirachta indica*) windbreaks on millet yield, microclimate, and water use in Niger, West Africa. In: Unger P W, Sneed T V, Jordan J R, Jensen R, eds. Challenges in Dry-land Agriculture — a Global Perspective. Amarillo: Tex Agric Exp Stn, 1988. 313~314
- 89 Miller D R, Rosenberg N J, Bagley W T. Soybean water use in the shelter of a slatfence windbreak. *Agric Meteorol*, 1973, 11: 405~418
- 90 Rosberg N J. The influence and implications of windbreaks on agriculture in dry regions. In: Shaw R H, ed. Ground Level Climatol, Am Assoc Adv Sci Symp, 1967. 327~349
- 91 Marshall J K. The influence of shelter on the productivity of grasslands and field crops. *Field Crop Abstr*, 1967, 20: 1~14
- 92 Dixon M, Grace J. Effect of wind on the transpiration of young tress. *Ann Bot*, 1984, 53: 811~819
- 93 Brenner A J, Jarvis P G, van deb Beldt R J. Windbreak-crop interactions in the Sahel. 2. Growth response of millet in shelter. *Agric For Meteorol*, 1995, 75: 235~262

- 94 Cleugh H A. Effects of windbreaks on air flow, microclimate and crop yields. *Agrofor Syst*, 1998, 41: 55~84
- 95 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, Dalcher A. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 505~531
- 96 Shen J, Takle E S, Arritt R W, Wang H. A simulation study of the relationship among surface heterogeneity, heat fluxes, and boundary-layer turbulence structure. In: *Symp Boundary Layers Tubul*, 12th Vancouver. Boston, Mass: Am. Meteorol. Soc, 1997. 569~570
- 97 Takle E S, Kao D T. A synthesis of models for describing multi-scale interactions within natural systems. In: Sydow A, Yu J Y, eds. 1998 Conf on Mission Earth: Model and Simul of the Earth Syst. San Diego, Calif: Soc. Comput. Simul. Int, 1998. 29~34
- 98 Clark T L, Jenkins M A, Coen J, Packham D. A coupled atmosphere-fire model: Convective feedback on fire-line dynamics. *J Appl Meteorol*, 1996, 35: 875~901

(中国科学院力学研究所 邵传平 王 薇 译  
李家春 校)

## SHELTERBELTS AND WINDBREAKS: MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTER SIMULATIONS OF TURBULENT FLOWS

WANG Hao Takle Eugene S SHEN Jinmei

Department of Computer Science and Department of Agronomy, Iowa State University, Ames, Iowa 50011;

E-mail: wanghao@cs.iastate.edu, gstakle@iastate.edu, jinmei@cs.iastate.edu

**Abstract** Shelterbelts or windbreaks were used for centuries to reduce wind speed, to control heat and moisture transfer and pollutant diffusion, to improve climate and environment, and to increase crop yields; but only within the last few decades have systematic studies considered the aerodynamics and shelter mechanisms of shelterbelts and windbreaks. This review examines recent modeling and numerical simulation studies as well as the mechanisms that control flow and turbulence around shelterbelts and windbreaks. We compare numerical simulations with experimental data and explain the relationships between sheltering effects and the structure of shelterbelts and windbreaks. We discuss how and why the desired effects are achieved by using numerical analysis. This chapter begins with the derivation of a general equation set for porous shelterbelts and windbreaks; the numerical model and simulation procedure are developed; unseparated and separated flows are predicted and characterized; the momentum budget and shelter mechanisms are analyzed; the effects of wind direction, density, width, and three dimensionality of shelterbelt structure on flow and turbulence are systematically described. Recent modeling and simulation of heat flux and evapotranspiration are also summarized. Finally, we discuss the use of highperformance distributed and parallel computing as well as clusters of networked workstations to enhance performance of the model applied to simulations of shelterbelts and windbreaks.

**Keywords** turbulent flows, aerodynamics, wind engineering, environmental fluid dynamics, porous media flows, heat and moisture transfer, parallel and distributed computing