

林带下风防护区中风速水平分布的研究

卫 林

(中国科学院自然资源综合考察委员会, 北京)

张 翼

(中国科学院地理研究所, 北京)

摘 要

本文通过对林带、风障等多次观测, 论证出在风与林带垂直时, 因林带阻摩作用引起的林后风速水平变化, 服从对数分布规律. 即: $U_{hz} = \frac{V_n^*}{k} \ln(h/h_n)$.

本文在建立林后风速水平分布方程同时, 还给出了有关参数的计算、预测方法, 以及利用公式的若干应用实例.

一、问题的提出

林带下风防护区中风的水平分布状况, 是分析林带动力效应的基础. 确知林后风的分布状况, 对直接估算林带削弱风的程度, 或是计算任意已知属性(如动量、热量、水汽、尘埃与二氧化碳等)的通量, 还是分析林带结构对风蚀、积雪等的影响, 都有直接关系. 早在上个世纪末, 一些国家就已开始对林带防护区与林前空旷地风速差异的观测. 以后 Константинов, Nägeli, Sims 等通过实际林带, 中间模型和风洞试验, 都对防护区中风的水平分布作过较详细的观测. 我国自50年代开始, 曹新孙、付抱扑、江爱良、朱劲跃、朱劲伟、宋兆民等也曾先后对不同结构林后的风速状况进行了大量地调查研究. 并阐述了林带结构、疏透度和透风系数等对风的影响. 然而直到目前为止, 被广泛用来表征风速水平分布的, 仍然是用实测数据点绘的风降曲线. 这种以相对风速为纵轴, 以不同树高倍数距离为横轴, 由实测风速点绘的风降曲线, 虽能反映出林后不同距离处的风速与同高度旷野风速的差异, 为鉴定林带削弱风的效果提供了方便, 但却存在下列缺陷:

(1)未能反映出来向气流与林带结构的特征, (2)难于进行数学处理, 依据这种风降曲线, 只能拟合出特定条件下的经验方程, (3)尤其应指出的是, 这种以曲线形式出现的风降曲线, 掩盖了风结构本身的一些固有特点. 如同风随高度变化, 在线性坐标中, 风速-高程曲线, 将一些与下垫面特征有关的重要流体力学特性, 如粗糙度、动力摩擦速度等被掩埋了.

风降曲线存在的这些缺点, 使其在理论上或实际应用上都受到了极大地限制. 因此寻求新的风速分布表示方法, 是分析研究林带防护效应的重要课题. 我们通过林后防护区中风速

水平分布的多次观测分析,发现当气流垂直林带时,如将林后水平距离线性坐标改换成对数坐标,则点绘的风降线为一折线。也就是说在线性坐标中以曲线形式出现的风降曲线,在半对数坐标中为折线形式,并明显地将防护区气流,区分成扩散区与辐合区二个部分。风速在扩散区随水平距离对数增加线性减小;在辐合区随水平距离对数增加线性增大。在半对数坐标中风降线的这一特点,使原来难以数学处理的风降曲线,可以简单地用分段线性化方法精确地描述,从而推导出林带防护区内风速水平分布具有与平坦裸地风速垂直分布相似的表达式。

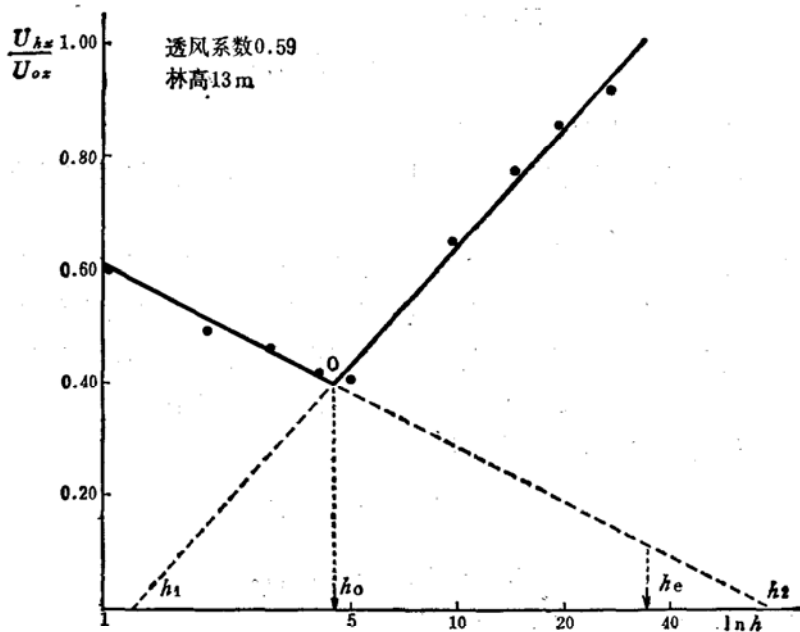
二、风速水平分布方程的建立

1. 方程式的推导

图 1 为用实测资料在半对数坐标中点绘的风降线。由图用分段线性化方法可得下列等式:

$$\frac{U_{hz}}{U_{0z}} = \begin{cases} b_1 + a_1 \ln h & 1 \leq h \leq h_0 \text{ (扩散区)}, \\ b_2 + a_2 \ln h & h_0 \leq h \leq h_e \text{ (辐合区)}. \end{cases} \quad (1)$$

$$(2)$$



(卫林等 1978 年河北省深县)

图 1 半对数坐标中的风降折线

式中 U_{hz} 为林后 h 倍树高距离处 z 高度上的平均风速 (cm/s); U_{0z} 为同高度旷野风速 (cm/s); U_{hz}/U_{0z} 为相对风速; h_0 为二条折线交点“0”的横坐标; h 为林带高度的倍数 (= 水平距离/树高); h_e 为林后风速恢复到林前旷野风速, 即 $U_{hz}/U_{0z} = 1$ 时的横坐标; a_1, a_2 , 为表征林带阻碍来流的障碍系数, 或称林障系数。

将图 1 中二条直线由交点 0 向下外延与横轴相交, 设交点为 h_1, h_2 。

当 $h = h_1$ 与 h_2 时, $U_{hz} = U_{h_1z} = U_{h_2z} = 0$ 有:

$$b_1 = -a_1 \ln h_1, \quad (3)$$

$$b_2 = -a_2 \ln h_2. \quad (4)$$

将(3),(4)式分别代入(1),(2)式整理得:

$$U_{hz} = \begin{cases} U_{0z} a_1 \ln h/h_1, \\ U_{0z} a_2 \ln h/h_2. \end{cases} \quad (5)$$

$$(6)$$

为了与风速垂直分布具有类似的表达式,将上述经验方程(5),(6)中的系数($U_{0z}a$)用变量置换法表示为:

$$U_{0z}a_1 = V_{*1}/k, \quad (7)$$

$$U_{0z}a_2 = V_{*2}/k, \quad (8)$$

式中 V_* 称作林障动力特征速度 (cm/s), k 为 Karman 常数.

V_* 的物理意义在于,它是林带阻碍来流运动综合指标,既反映林带结构的特征,又反映来向气流的特征,同时还是气流流速对水平距离对数的递增率.

将(7),(8)式代入(5),(6)式,就得到林带下风防护区内风速水平分布方程:

$$U_{hz} = \begin{cases} \frac{V_{*1}}{k} \ln(h/h_1), \\ \frac{V_{*2}}{k} \ln(h/h_2). \end{cases} \quad (9)$$

$$(10)$$

由(9),(10)式风速水平分布方程可以看到:

(1) 当风垂直林带时,因林带阻摩作用引起的风速水平变化,与风速垂直分布受地表摩擦影响类似,符合对数分布规律.

(2) 因方程(9),(10)将影响防护区内风速水平变化的诸多因子(来向气流流速,林带结构,林带高度等)有机的结合在一起,所以能较全面地阐明防护区内风速水平分布的特征.

(3) 在林前风速 U_{0z} 不超过林带本身抗风强度时,林后风速 U_{hz} ,在扩散区与 V_{*1} 和水平对数距离的乘积成反比(因 $V_{*1} < 0$);在辐合区则与 V_{*2} 和水平对数距离的乘积成正比.

为简便起见,可将(9),(10)式合并,写成:

$$\text{或} \quad U_{hz} = \frac{V_{*n}}{k} \ln(h/h_n) \quad (11)$$

$$U_{hz} = U_{0z} a_n \ln(h/h_n),$$

式中: 当 $1 \leq h \leq h_0$ 时,即扩散区,取 $n = 1$

当 $h_0 \leq h \leq h_c$ 时,即辐合区,取 $n = 2$

2. 方程式的验证

检验林带防护区内风速水平分布方程,即(11)式,关键是看在半对数坐标中,林后风速水平分布是否真正具有分段线性化的特征.为此,我们选用了国内外一些典型风洞、模型和林带观测资料进行了验证^[1-4].图2—5就是分别按 Nægeli (1946年)田中贞雄(1953年)风障试验资料,朱廷跃(1977年),风洞模型资料,和新疆林业科学研究所(1976年)林带观测资料,在半对数坐标中点绘的风降线.从这些图中很清楚地看到,尽管不同作者,在不同地区,使用不同设备手段,对不同对象(风障、模型与林带实体)进行的测量,分段线性化特征在半对数坐标中始终保持不变,且各条折线与测量数据的相关系数均在 0.95 以上(表1),这就证明了上述风速水平分布方程推导的基础是可靠的,并具有普遍意义.

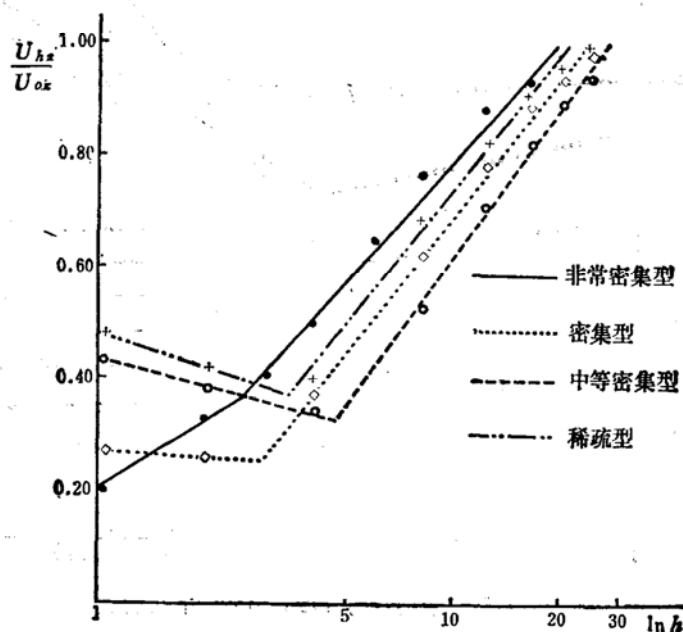


图 2 根据 Nægeli 1946 年风障试验资料

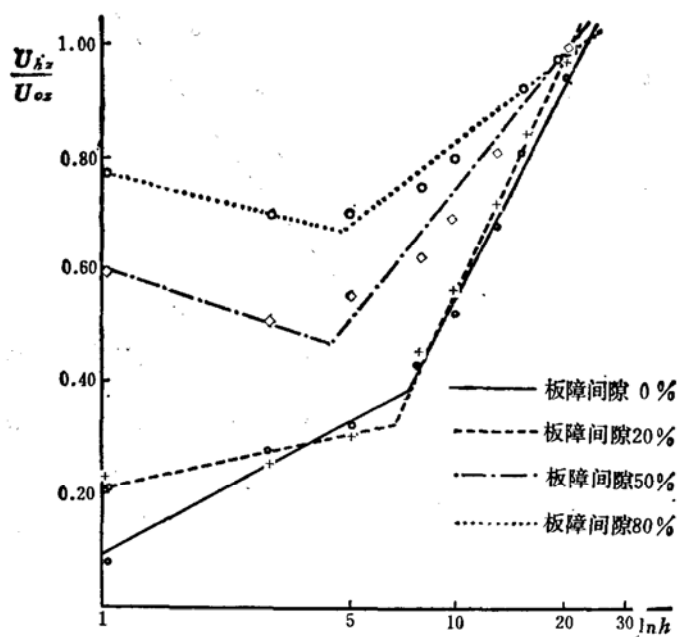


图 3 根据田中贞雄 1953 板障试验资料板障高 80cm

3. 方程式中参数的计算与预测

确知方程(11)中 a_n , h_n 二个参数, 才能用它作进一步地分析。通常林后风速水平分布受林前风速大小, 林带结构情况以及林相特征(有叶、无叶)等多种因子的制约。但对一个已知林带, 由于上述各因子已固定, a_n , h_n 就不难由对数坐标中实测资料点绘的风降线, 用回归方法确定。但在防护林规划设计中, 常常希望能预先知道某种防护林后的风速分布, 这就要求能先

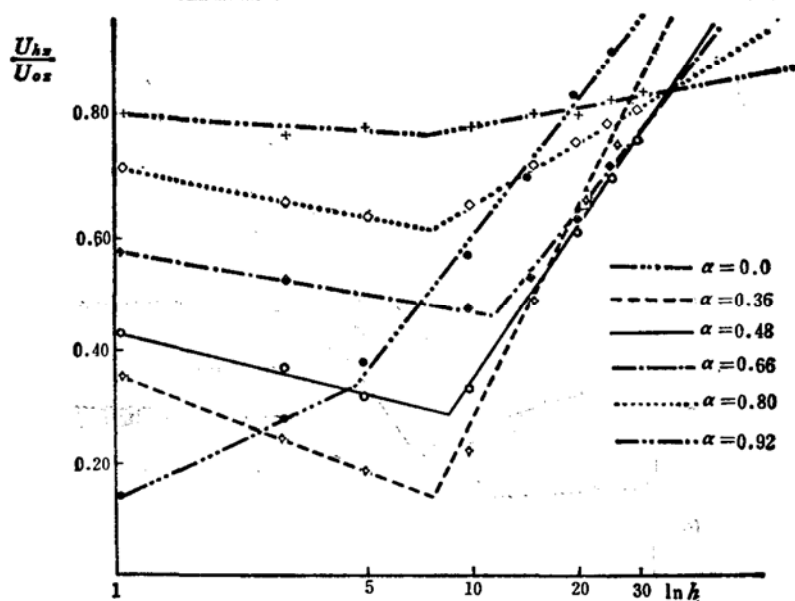


图4 根据朱庭跃、朱劲伟等 1963—1977 年风洞试验资料

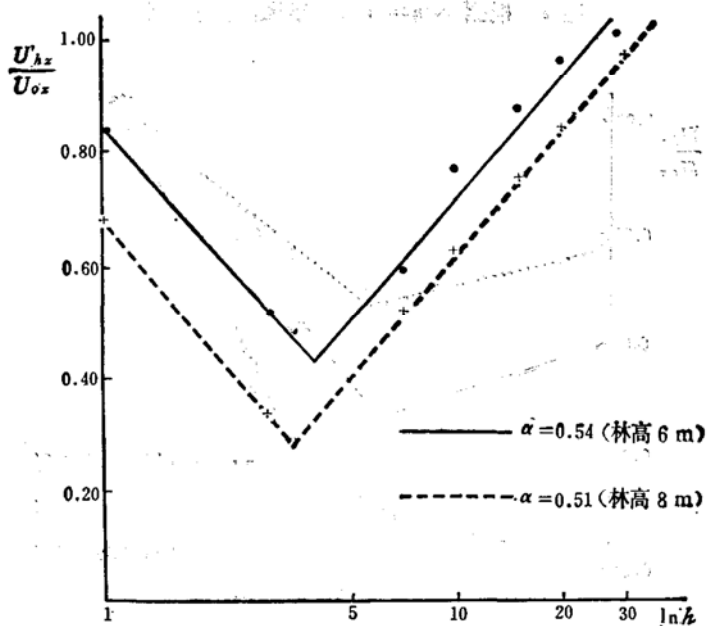


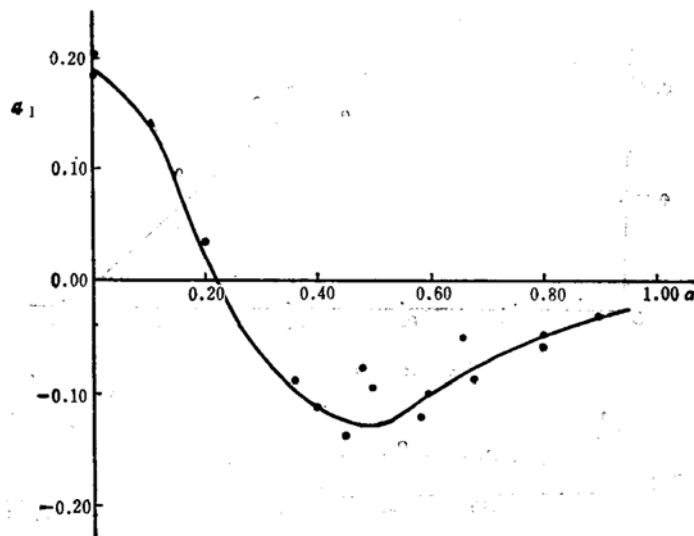
图5 根据新疆林业科学研究所 1975 年林带观测资料

估算出 a_n, h_n 二个参数。

由图 2—4 可以看到,在不考虑林相变化(因防护期都处于有叶期)和取用相对风速时,防护区内风速分布主要取决于林带结构。不同结构林带有明显不同的风降线。因此,只要给出林带结构与 a_n, h_n 之间的关系,就能估算出防护区内风速的水平分布特征。目前常用表征林带结构特征的要素,有林带宽度、行数、疏透度和透风系数等。由于透风系数反映林带综合动力效应最好,并已为生产部门广泛采用。据此,我们采用透风系数,由上述典型试验材料,结合作者的风障与林带观测资料^[5,6],绘制出透风系数与 a_n, h_n 的关系图 6—9。这样,在已知某

表 1 半对数坐标中风降折线与测量数据的相关分析

通风系数 $\alpha(\%)$	扩散区 $U_{hx}/U_{0x} =$	相关系数 r	辐合区 $U_{hx}/U_{0x} =$	相关系数 r	资料来源
0	$0.153\ln h + 0.126$	0.99	$0.386\ln h - 0.315$	0.99	朱庭跃、朱劲伟等 1963—1977 年 风洞试验
36	$-0.09\ln h + 0.345$	-0.98	$0.562\ln h - 1.048$	0.99	
48	$-0.066\ln h + 0.433$	-0.99	$0.408\ln h - 0.607$	0.99	
66	$-0.045\ln h + 0.578$	-0.99	$0.356\ln h - 0.427$	0.99	
80	$-0.049\ln h + 0.731$	-0.99	$0.149\ln h + 0.329$	0.99	
92	$-0.027\ln h + 0.827$	-0.95	$0.053\ln h + 0.672$	0.95	
0	$0.157\ln h + 0.074$	0.99	$0.473\ln h - 0.511$	0.97	田中贞雄 1953 年 风障试验
20	$0.034\ln h + 0.218$	0.98	$0.515\ln h - 0.601$	0.99	
50	$-0.087\ln h + 0.597$	-0.99	$0.342\ln h - 0.062$	0.97	
80	$-0.06\ln h + 0.773$	-0.98	$0.247\ln h + 0.266$	0.96	
51	$-0.328\ln h + 0.689$	-0.99	$0.211\ln h - 0.094$	0.99	新疆林业科学研究 所 1975 年林带 观测
52	$-0.180\ln h + 0.673$	-0.99	$0.322\ln h - 0.155$	0.99	
54	$-0.299\ln h + 0.842$	-0.99	$0.282\ln h - 0.079$	0.96	
59	$-0.126\ln h + 0.590$	-0.99	$0.311\ln h - 0.079$	0.99	卫林 1979 林带观测
8	$0.173\ln h + 0.350$	0.99	$0.223\ln h - 0.348$	0.99	张翼等 1984 年风障观测

图 6 α 与 a_1 的关系

一林带通风系数情况下,由图 6—9. 查得相应的 a_n, h_n 后,就可得出林后风速分布的具体表达式。现举例说明如下:

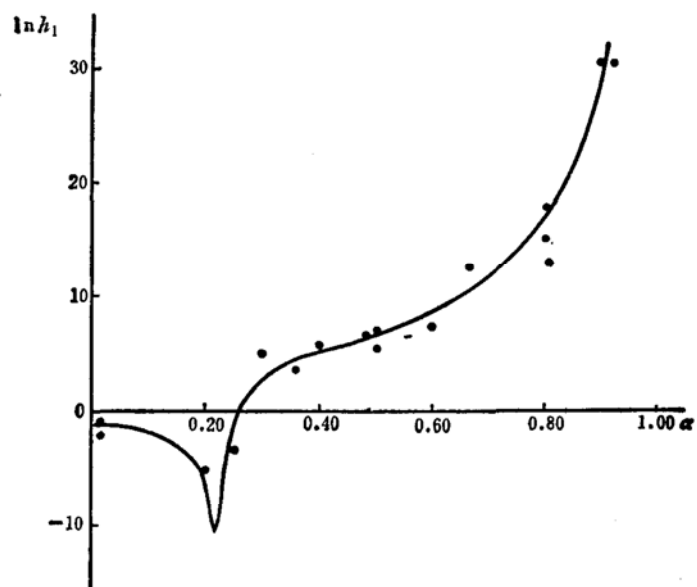
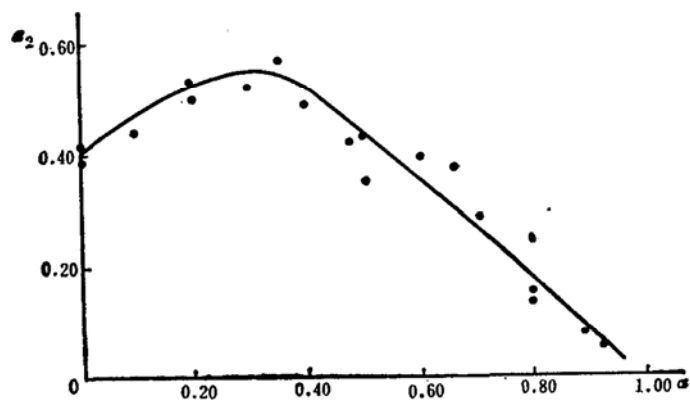
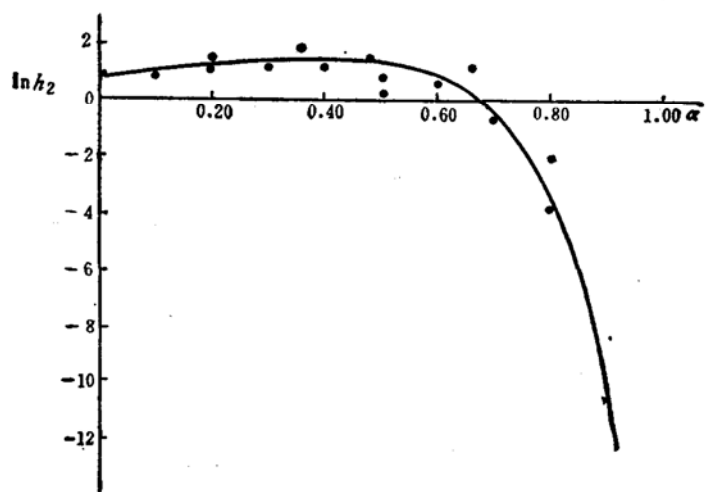
据实地调查,株行距为 $1.5 \times 4.7\text{m}$, 宽 4.7m , 高 10m , 枝下高 1.9m , 15 年生二行白榆组成的林带,通风系数(α)为 0.70 , 由图 6—9 查得:

$$a_1 = -0.07,$$

$$\ln h_1 = 11.50, h_1 = 98715.8,$$

$$a_2 = 0.27,$$

$$\ln h_2 = -0.40, h_2 = 0.67.$$

图 7 α 与 $\ln h_1$ 的关系图 8 α 与 a_2 的关系图 9 α 与 $\ln h_2$ 的关系

又知当地 8 月经常危害水稻害风的平均风速为 12m/s, 将此风速折换到水稻高度 1m 处, 风速约 5.0m/s. 则由(7),(8)式得:

$$\begin{aligned} V_{*1} &= U_{0100} \cdot a_1 \cdot k \\ &= 500 \times (-0.07) \times 0.4 \\ &= -14.0(\text{cm/s}), \\ V_{*2} &= U_{0100} \cdot a_2 \cdot k \\ &= 500 \times 0.27 \times 0.4 \\ &= 54.0(\text{cm/s}). \end{aligned}$$

代入(9),(10)式, 得出: 二行白榆林带在平均害风出现时, 林带下风防护区内, 1m 高度上, 风速的水平变化为:

$$U_{h100} = \begin{cases} \frac{-14.0}{k} \ln(h/98715.8) & (\text{扩散区}), \\ \frac{54.0}{k} \ln(h/0.67) & (\text{辐合区}). \end{cases}$$

三、方程的应用

林后风速水平分布方程概括了影响风速变化的诸多因子, 有着较广泛的应用, 现枚举二例如下:

1. 求算林带防护区内气流垂直速度 W .

在风向垂直林带二维情况下, 取连续方程:

$$\frac{\partial U_{hz}}{\partial h} = - \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (12)$$

对林某其一固定点积分(12)式, 得:

$$\begin{aligned} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial U_{hz}}{\partial h} dz &= - \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial W}{\partial z} dz \\ &= - \int_{W_1}^{W_2} dW = W_1 - W_2, \end{aligned}$$

即

$$W_2 = W_1 - \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial U_{hz}}{\partial h} dz, \quad (13)$$

因

$$\frac{\partial U_{hz}}{\partial h} = \frac{a_n}{h} \cdot U_{0z} = \frac{a_n V_{*0}}{kh} \ln(z/z_0),$$

式中 z_0 , V_{*0} 分别为旷野裸地粗糙度与摩擦速度. 故(13)式可以写成:

$$W_2 = W_1 - \int_{z_1}^{z_2} \frac{a_n V_{*0}}{kh} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) dz. \quad (14)$$

利用边界条件, $z_1 = z_0$ 时, $W_1 = 0$; $z_2 = z$ 时, $W_2 = W_z$, 求解上式, 并略去较小项 z_0/z . 得林后垂直速度一般表达式:

$$W_z = \frac{a_n V_{*0} z}{kh} \left(1 - \ln \frac{z}{z_0}\right). \quad (15)$$

由(15)式可以得出林后垂直速度是林障系数 a_n , 旷野摩擦速度 V_{*0} , 以及测量高度 z 和林后距离四者的函数; 同时可以得出, 在林后防护区内存在着一个特殊的物理界面, 其高度相当于 $z/z_0 = e$. 值得指出的是, 对林后扩散区, 这一界面相当于一个“源”, 气流由这个界面向上和向下扩散, 对林后辐合区, 这一界面相当于一个“汇”, 上下气流向这个界面汇集.

2. 求算林带有效防护距离

林带有效防护距离是设计规划防护林的重要参数之一. 它被定义为: “使林后指定防护对象(某种作物或土壤), 不受平均害风风力危害(包括生理危害和机械损伤)的水平距离”^[7]. 由于方程(11)式集林前风速、林后风速、林带结构和风变距离于一体, 概括了地区风力状况、作物自身抗风能力以及林带结构特征诸个方面, 符合有效防护距离定义的含义. 因此, 应用方程(11)式可以直接计算林带的有效防护距离, 为方便起见, 将(11)式改写成:

$$h = h_n e^{U_{hz}/U_{0z} a_n} \quad (16)$$

并令 U_{0z} 为危害某一指定作物害风的平均风速, U_{hz} 为该作物的风害指标. 同时考虑到有效防护距离是林后扩散区与辐合区中, 两个开始出现风害点的距离差, 则有效防护距离 h 可以进一步表示为:

$$h = \begin{cases} h_0 e^{U_{hz}/U_{0z} a_1} - h_1 e^{U_{hz}/U_{0z} a_1}, & \text{当 } \frac{U_{hz}}{U_{0z}} < 1, \\ h_2 e^{1/a_2} - h_1^{1/a_1}, & \text{当 } \frac{U_{hz}}{U_{0z}} \geq 1. \end{cases} \quad (17)$$

现举例说明如下: 如仍用前面提到的二行白榆林带, 当在林后防护区中栽培水稻, 已知 $a_1 = -0.07$, $a_2 = 0.27$, $h_1 = 98715.8$, $h_2 = 0.67$, 和水稻风害指标 (1m 高度 5m/s). 则由(17)式可得不同旷野风速下, 林带有效防护距离于表 2. 由表 2 看到, 在林带结构与作物不变时, 不同旷野风速, 林带有效防护距离不同, 当旷野 1m 高度, 风速大于等于 8m/s 时, h 为负数,

表 2 同一结构、同一作物不同风速下林带有效距离的变化

距离(林高倍数) 1m 高度旷野 风速 (cm/s)	$h'' = h_2 e^{U_{hz}/U_{0z} a_2}$	$h' = h_1 e^{U_{hz}/U_{0z} a_1}$	有效防护距离 $h = h'' - h'$	说 明
800	6.8	13.1	-6.3	无作用*
700	9.4	3.7	5.7	有一定作用
600	14.6	0.7	13.9	有较大作用
500	27.2	0.1	27.1	达最大作用

* 负数表示防护区内任意点的风速都比作物风害指标大, 即表征作物风害指标的水平直线与二条风降折线交点, 落在风降线的延长线上.

表明二行白榆林带对水稻已无防风作用。但风速在 8m/s 以下, 林带显示出较好的防护作用。如风速 7m/s 时, $h = 5.7H$ (H 为林带平均高度), 6m/s 时, $h = 13.9H$, 5m/s 时, 达最大, $h = 27.1H$ 。小于 5m/s 的风速, 因对水稻无直接伤害作用, 从风害角度来说, 讨论林带有效防护距离已无意义。由(11)式变形而来的(17)式, 还可以计算同一结构林带, 在不同风害地区的有效防护距离, 以及风力一定时, 同一结构林带对不同抗风能力作物的有效防护距离。

参 考 文 献

- [1] Nāgeli. W., Le probleme de la protection contye les vents: son application en Israël. La-Yaaran, 1956, 6: 5—14, 36—38.
- [2] 田中贞雄等, 日本农业气象, 18(1953) 第 1,2 期。
- [3] 朱廷跃等, 中国科学院林业土壤研究所集刊, 1981, 5: 29—45.
- [4] 新疆林业科学研究所, 中国林业科学试刊, 1975, 35—41.
- [5] 卫林等, 林业科学, 1981, 2: 155—161.
- [6] 张翼等, 中国科学 B 辑, 1986, 9: 948—956.
- [7] 卫林等, 科学通报, 30(1985), 19: 1567—1570.