

农田风状况及其模式*

翁笃鸣 沈觉成 钱林清** 陈万隆 高家表

(南京气象学院气象系)

提 要

本文讨论了农田中风速的水平和铅直分布的基本规律性。指出农田植被中的风速廓线具有上下不对称的“S”型分布。分析了农田植被中风速水平和铅直分布廓线常见模式的缺点,在理论分析和经验拟合的基础上提出了新的描述农田植被中风速的通用模式。按此模式计算的平均风速,无论水平分布或铅直廓线都与实际情况比较一致。

一、引 言

农田植被中的风状况对作物的正常生长发育有很大的作用,它直接影响农田植被中热量、水汽和二氧化碳的输送,从而改变农田的小气候状况。因此,研究农田植被中的风状况是农田小气候研究的重要方面。虽然国外在这一方面进行过某些研究,但由于植物群落构造的复杂性以及观测仪器和条件的限制,人们对农田风状况的认识至今仍然是不充分的。

1978—1979年间,我们曾先后在山西交城和南京等地利用热球微风仪和轻便风速表对多种作物农田的风状况进行了观测,得到一些初步结果,简析如下。

二、农田中风速的水平分布

气流由空旷地流经农田植被,由于植物体的阻碍摩擦作用,使得风速不断地受到削弱,因而引起农田植被中热量、水汽及 CO_2 输送的一系列变化,这就是人们熟知的风的边效应。作物对气流的削弱作用与作物种类、种植方式、播种密度、生育阶段等有关。通常采用如下经验关系来描述它的水平分布:

$$u_x = u_0 \cdot e^{-\beta x} \quad (1)$$

式中 u_x 为农田中任一点(离边行为 x 米)的风速; u_0 为边行风速; β 为削弱系数,可通过经验途径取得。

(1)式表明气流由边行向里输送时,如同辐射能在大气中传播一样,受到植被(作为一种介质)连续不断的削弱的结果。这是比较公认的。但是,该式还是有缺点的,因为它并不严格符合大块农田中的情况,由(1)当 $x \rightarrow \infty$ 时, $u_x \rightarrow 0$,而实际情况并非如此。

针对上述情况,我们在分析套作农田通风条件^[1]时,曾根据实测资料提出平均风速和脉动风速的水平分布式:

* 本文于1980年3月24日收到,1981年10月19日收到修改稿。

** 钱林清同志的工作单位是山西省气象科学研究所。

$$\bar{u}_n = \bar{u}_0(\alpha \cdot 10^{-\beta n} + c) \quad (2)$$

$$\sqrt{u'^2} = \sqrt{u_0'^2}(\alpha' \cdot 10^{-\beta' n} + c') \quad (3)$$

式中 \bar{u}_n 、 \bar{u}_0 分别为农田中第 n 行和边行 2/3 株高处的平均风速； $\sqrt{u_n'^2}$ 、 $\sqrt{u_0'^2}$ 分别为相应的脉动风速。上述式子不仅能与实测资料很好地配合，而且能合理地解释农田中风速和风脉动的水平分布情况。它们表明，当 $n \rightarrow \infty$ 时，农田中的平均风速和脉动风速仍然存在，分别为 $\bar{u}_n \rightarrow \bar{u}_0 c$ ， $\sqrt{u_n'^2} \rightarrow \sqrt{u_0'^2} \cdot c'$ 。显然，这是动量从植被顶部向下铅直输送的结果。关于这个问题，我们在下面还会讨论到。

风速和脉动风速的这种水平分布情况，对各种作物都是适合的(图 1)¹⁾。由图可见，农田风速的水平分布是先由边行向里迅速递减，然后深入田间一定距离后就保持在某一

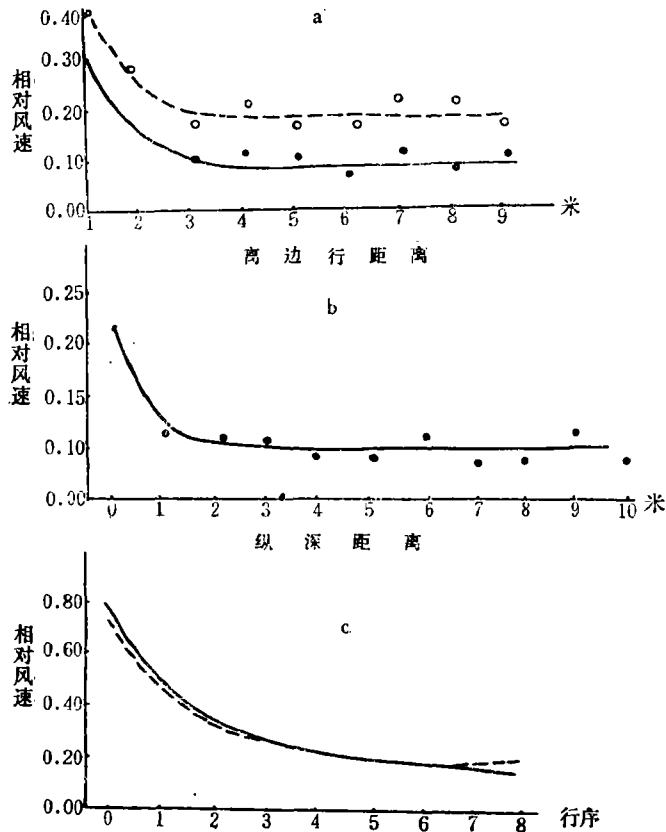


图 1 农田中风速的水平分布 (实线为相对风速, 虚线为相对脉动风速)

a, 玉米地 2/3 株高(1978 年 7 月 22 日),

b, 小麦地 2/3 株高, 由迎风边行至纵深的变化(1978 年 5 月 31 日—6 月 10 日),

c, 小麦地 70 厘米高(1978 年 6 月 19 日)

水准上。此外,对于不同作物(玉米、小麦),由于各自所处的生育阶段不同,植被密度相差较大(玉米拔节期,小麦乳熟期),虽曲线形式相似,但递减速率不同。当时玉米叶面积密

1) 为了保证观测资料的可比较性,文中有关风速和脉动风速资料都取相对值,即以各点实测值与旷地对照点(2 米高)观测值 u_2 、 $\sqrt{u_2'^2}$ 的比值表示。

度较小, 通风条件较好, 所以水平风速从边行向里直至 3 米, 都反映出边行风的影响(图 1a), 而小麦的纵深影响只达到 2 米左右(图 1b)。

图 1c 则反映了当风向垂直于行的走向时, 小麦地 70 厘米高处平均风速和脉动风速由边行向里逐行变化的情形, 它表示出边行的透风效应大致可维持 3 行左右。所以, 在套作农田中常常利用前后茬作物生长阶段的不同, 适当留有空行, 这对改善田间通风条件、促进农作物的生长发育是有利的。

我们还可遇到另一种平均风速和脉动风速水平分布情况(图 2)。这种风速分布状况可在两种作物高度相差很大的农田(如中茬玉米与晚茬高粱)中观测到。在图 2 上玉米株高 115 厘米, 而后茬高粱处在苗期仅高 12 厘米。此时, 在双行玉米带与带之间形成 3.0 米宽的通道。当风向垂直于玉米行时, 玉米行起了风障作用, 明显地削弱了风速。在前、后玉米带间, 风速变化情况大致是这样的: 从前玉米带(迎风带)开始, 向后水平风速明显减弱, 然后随着距离的增大, 风速慢慢恢复增大, 至 2 米左右达到最大(约占 2 米高处对照点风速的 30% 左右), 然后, 又因后玉米带的影响, 风速再度减小, 完成一次变化过程。这种分布特点类似于林带前后的风速水平分布情况。

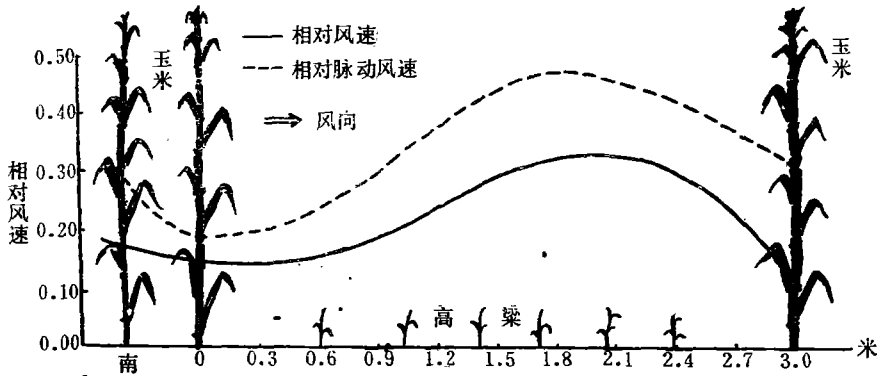


图 2 玉米套高粱 70 厘米高处风速的水平分布

三、农田中风速的铅直分布

研究植株间风速和风脉动的铅直分布, 可以了解植株对于动量交换及其交换系数的影响。文献^[2-4]表明, 无论在农作物中还是在森林内风速的铅直分布不是一种简单自上而下的递减曲线。我们曾先后对多种作物(小麦、玉米、谷子和水稻等)进行平均风速和脉动风速的铅直分布观测。结果表明, 植株间平均风速和脉动风速随高度的分布呈不对称的“S”型(图 3)。为了说明问题, 图上还附有玉米、谷子、水稻的相对叶面积密度函数¹⁾曲线。由图 3 看出, 风速的铅直分布规律与叶面积垂直结构有很大的关系。在作物上层, 由于风速突然受到植被的阻挡作用, 风速由植被表层向下迅速减小, 其减小的速度与叶面积

1) 相对叶面积密度函数定义为单位厚度的一层内的叶面积与整层叶面积(即作物的总叶面积)之比记为:

$$f(y) = \frac{1}{F_H} \frac{dF(y)}{dy}$$

这里 y 为高度(由植株顶部向下计量), $F(y)$ 为由顶部至 y 的累积叶面积; F_H 为总叶面积, 即由顶部至地面的累积叶面积, H 为株高。由定义知 $\int_0^H f(y) dy = 1$ 。

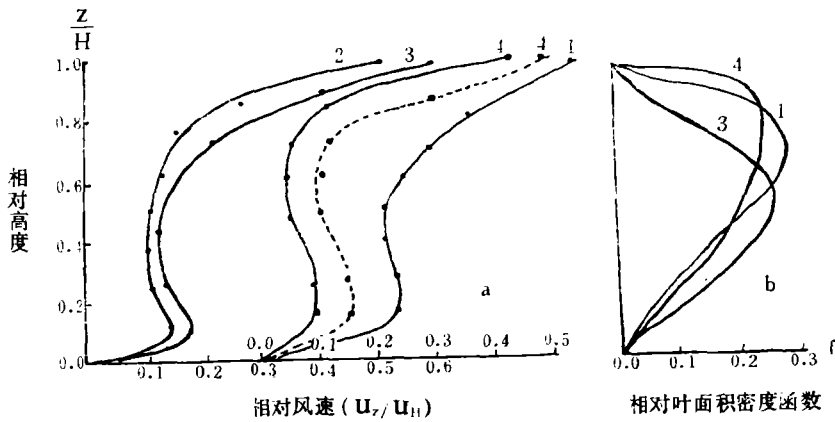


图 3 各种作物地中相对风速随高度的变化

(实线为风速,虚线为相对脉动风速) 1,谷子(株高 1.4);2,小麦(0.9 米);3,玉米(2.7 米);4,水稻(0.95 米)

密度函数成正比。在2/3株高以下,风速向下的递减趋势明显地减弱,风速随高度变化很小。再向下风速反而递增,并出现程度不等的风速次大值,最后接近地面处风速降至为零。这就形成一种形如“S”状的曲线。很明显,单纯地应用铅直方向的动量交换原理是不能完全解释这种风速铅直分布特点的,还必须考虑水平方向的动量输送问题。农田植被中风速铅直分布之所以出现次大值,是因为植被下部的茎叶比较稀疏、水平方向输送较多的动量所造成的。当然,植被中水平方向的动量输送是普遍的,在植被的各高度上都存在,只是数量不等而已。

此外,不同作物由于密度不同,平均风速的铅直分布廓线可有某些差异(图3)。但对于同一种作物,虽然生育期不同,植株间的相对风速铅直分布廓线仍然大致相似(图4)。

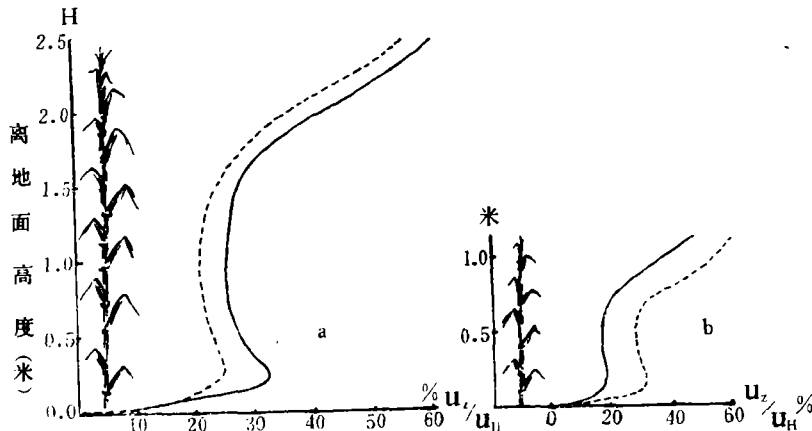


图 4 10 尺带宽玉米行间相对风速的铅直分布

(实线为相对风速,虚线为相对脉动风速)

a, 抽雄期; b, 拔节期

描述农田植被内的风速铅直分布通常用如下的指数形式^[5-7]

$$u_z = u_H e^{-a(H-z)}$$

(4)

式中 Z 表示高度并从地面向上计量; H 表示植株高度; u_z 和 u_H 分别表示高度 Z 处和植株顶部的风速; α 为某一经验系数。

在一般的农田中, 该式只能描述植株上半部风速随高度变化的情况, 而不能反映植株下半部风速铅直分布的特点, 尤其在粗糙高度上按(4)式计算会得到不合理的结果。(4)式的缺陷主要在于它未能考虑植被内水平方向的动量输送, 这就在农田小气候研究中提出了如何正确建立农田风速分布模式的问题。

四、农田中平均风速的通用模式

从理论上讲, 在定常运动和忽略垂直运动的条件下, 并且只考虑气流沿着平均风向的 x 轴运动, 则农田植被中的运动方程可以写作

$$u \frac{\partial u}{\partial x} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] = 0 \quad (5)$$

式中 u 表示风速; K_x , K_y 和 K_z 分别表示沿水平方向 x , y 和铅直方向 z 的动量交换系数。 K_x , K_y 和 K_z 可以理解为高度 z 、相对叶面积密度函数 f 、离边行距离 x 以及稳定度 r 的复杂函数, 即

$K_x = K \cdot \varphi_1(z, f, x, r)$; $K_y = K \cdot \varphi_2(z, f, x, r)$; $K_z = K \cdot \varphi_3(z, f, x, r)$ 由于植被群落构造的复杂性, 目前尚无法精确地建立起有关农田植被内动量交换系数 K_x , K_y 和 K_z 的函数形式。因此, 要从理论上求解方程(5)是有困难的。

为此, 我们试用半经验半理论的途径来适当解决植被中风速分布的问题。可以认为植被内任一高度上的动量输送过程都能分解成水平和铅直输送两部分。前者是由植被边行空间沿平均风方向向植被内部输送; 而后者则是由植被上表面向下的湍流扩散。其结果使得农田中的风廓线明显地偏离空旷地上的典型形式。所以, 原则上可用下列分析式描述农田植被中的风速分布

$$u = u' \cdot \Phi(x, f) \quad (6)$$

这里 u' 和 u 分别表示空旷平地上和农田中同一高度处的风速; $\Phi(x, f)$ 为一修正函数; f 的意义同上。如以公认的对数廓线表示 u' , 那么上式又可以写为

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \Phi(x, f) \quad (7)$$

上式 z_0 代表空旷平地的粗糙高度。

假设修正函数 $\Phi(x, f)$ 包括对动量的水平输送订正与铅直输送订正两部分, 即

$$\Phi(x, f) = \alpha \Phi_1(x, f) + \beta \Phi_2(f) \quad (8)$$

式中 α 、 β 为系数, 分别表示水平输送和铅直输送的权重, 应有 $\alpha + \beta = 1$ 。对于农田边行和植株顶部有

$$\Phi(0, 0) = 1; \Phi_1(0, 0) = 1; \Phi_2(0) = 1,$$

现在分析 Φ_1 和 Φ_2 的函数表达式。对于水平输送订正项, 可仿照 Beer 定律写成

$$\Phi_1(x, f) = e^{-Cx} \quad (9)$$

式中 C 为植被对动量的削减系数。(9)式表示随着相对叶面积密度函数 f 和离边行距离 x 的增大, 水平的动量输送按指数关系递减。这种订正形式比经验式(1)更具有普遍性。

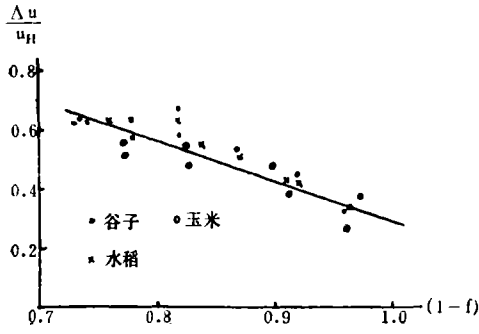


图 5 $\frac{\Delta u}{u_H}$ 与 $(1-f)$ 的相关

至于铅直输送订正函数 $\Phi_2(f)$, 可以认为是植被对动量铅直扩散的阻滞作用, 它应与相对叶面积密度函数 f 有关。为了确定 $\Phi_2(f)$ 的形式, 我们先分析一下几种作物地风速铅直分布廓线与对数分布廓线之间的相对偏差 $\frac{\Delta u}{u_H}$ 同 $(1-f)$ 的关系(图 5)。图 5 清楚地反映出两者之间的负相关情况, 亦即当 $(1-f)$ 越大(植被越稀疏), 偏差 $\frac{\Delta u}{u_H}$ 就越小(风速廓线受植被影响越小), 反之若 $(1-f)$

越小, 则偏差 $\frac{\Delta u}{u_H}$ 就越大。因此采用 $\Phi_2(f) = 1-f$ 形式是恰当的。

于是最终可得到总的植被订正函数

$$\Phi(x, f) = \alpha \cdot e^{-cx} + \beta(1-f) \tag{10}$$

因此, 农田植被内的风速可表示为

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \left[\alpha \cdot e^{-cx} + \beta(1-f) \right] \tag{11}$$

这就是农田植被中平均风速的通用模式。它能满足以下各种边界条件:

当 $z=H$ 时, $f=0, u=u_H,$

及 $z=z_0$ 时, $u=0;$

当 $x=0$ 时, $f=0$ (测点位于农田边缘), 有

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0},$$

及 $x \rightarrow \infty$ 时,

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \beta(1-f),$$

表示没有动量水平输送的影响。

由(11)式还可求出农田植被中风廓线极小值的出现高度 z_m , 有

$$z_m (\ln z_m - \ln z_0) = \frac{\alpha e^{-cx} + \beta(1-f)}{[\alpha c x e^{-cx} + \beta] \frac{\partial f}{\partial z}} \tag{12}$$

上式表明, 只有当 $\frac{\partial f}{\partial z} > 0$ 时, z_m 才大于零, 亦即高度 z_m 应略低于相对叶面积密度函数 f 的最大值的下方 ($\frac{\partial f}{\partial z} > 0$)。这很可理解, 因为在这里总的动量削弱最多。图 3 a, b 清楚地说明这一点, 并且表明, 水稻田中风廓线(图 a 曲线 4) 极小值的相对高度之所以比玉米地风廓线(图 a 曲线 3) 极小值的相对高度高, 其原因就在于它们各自的相对叶面积密度函数曲线(图 b) 的最大值的出现部位不同。相应地谷子地中风廓线(图 a 曲线) 极小值的

高度则介于两者之间。

另外, (11)式也适用于描述植被上方平均风速铅直分布的特征, 但此时粗糙高度 z_0 相应地改变为 $(d+z_0)$, 这里 d 表示植被的零平面位移高度, 而 $f=0$, $\alpha+\beta=1$ 。

需要指出, (11)式是针对撒播作物田建立的。对于条播作物田, 式中 x 应改为由边行向里的行数 n , 即有

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \left[\alpha \cdot e^{-\alpha n f} + \beta (1-f) \right] \quad (13)$$

(11)和(13)式中的系数 a, c, α, β 可通过经验途径获得, f 也可通过实测得到。一般地说, 对于禾本科作物 f 具有相似分布。根据小麦田 70 厘米高处实测平均风速的水平变化资料^[1]得到: $\alpha=0.74, \beta=0.26, a=2.78$ 。

图 6 为 $z_0=0.01$ 米时按(13)式计算的小麦田各行间的风速廓线, $z_0=0.03$ 米时的形式与之相仿。由图可见, 植被中各行间风速铅直分布呈“S”型, 虚线表示小麦田第六行的

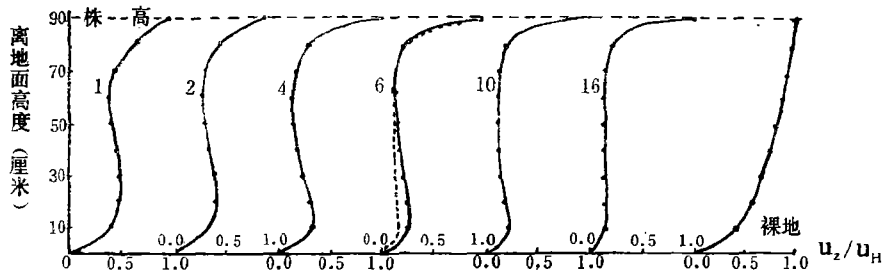


图 6 小麦田中各行间的风速廓线(计算值)

实测风速铅直分布, 计算结果与实测风速廓线基本一致, 计算误差主要由于观测日期与计算日期不同所致。从图上还可看出, 各行相应高度上的风速随行数的增加而逐渐变小, 风速廓线中次大值出现的高度随行数的增加而降低, 并渐趋消失。这些特点都可以从物理上得到满意的解释。

另外, 按(13)式计算小麦田 70 厘米高处风速与实测值的比较列于表 1 中, 二者颇为一致。

表 1 小麦田 70 厘米高处相对风速计算值与实测值的比较
株高 95 厘米 (1978.6.19)

行 序	1	2	4	6	8
计 算 值	0.47	0.31	0.20	0.17	0.16
实 测 值	0.48	0.32	0.23	0.17	0.16

我们还按(13)式计算了小麦田中 80 厘米、50 厘米、20 厘米高度上平均风速的逐行变化曲线(图 7), 可以看出, 对于 2/3 株高附近的部位, 由于植物相对叶面积密度函数最大, 因此风速向里行递减最快, 约从第四行开始基本上稳定下来, 而对于相对叶面积密度函数较小的下部(20 厘米高处), 风速由边行向里行的递减速度比较缓慢, 而且风速比中

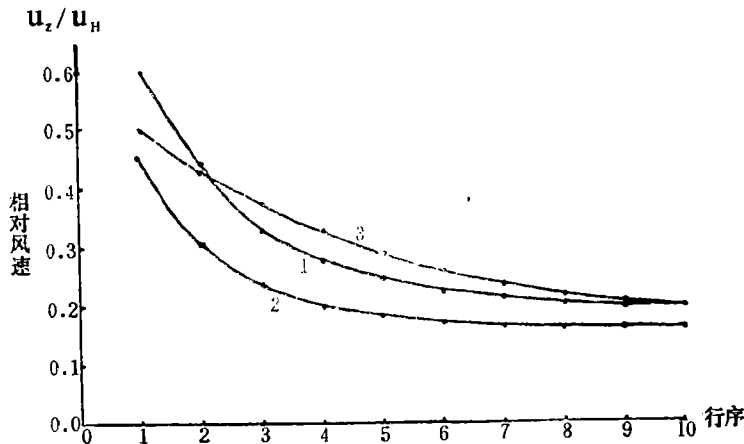


图 7 小麦地中不同高度风速随行序的变化(计算值)
1—80 厘米;2—50 厘米;3—20 厘米

层还大。80 厘米高处的风速向里行递减也比较缓慢, 风速亦比 50 厘米高处大。但是造成此种现象的原因是不同的。对于下层, 平均风速之所以比 50 厘米高处大, 主要是由于动量水平输送引起的, 而对于上层(80 厘米), 则主要是由于接近植被顶部, 在此高度上动量的铅直输送较大, 同时也受到动量的水平输送的影响。

五、小 结

1. 农田中的风状况主要是由于作物群落对气流运动的影响所造成的。在忽略稳定性影响的条件下, 植被对气流运动的影响, 可以分成植被对动量的水平输送和铅直输送等二个方面的影响。作物对动量的水平输送的影响结果, 使得风速在农田中具有水平变化的规律性, 即在气流进入农作物的最初阶段大致按负指数律递减, 但随离农田边行距离的增加, 风速递减趋势很快减弱并逐渐维持在一定的水准上。作物对动量的铅直输送的影响, 大致与植物相对叶面积密度函数呈线性负相关。

2. 农田植被中平均风速的铅直分布呈上下不对称的“S”型, 即从植株顶部向下风速迅速递减, 至 2/3 株高附近出现最小风速, 向下风速变化甚小, 再向下风速有所回升并在靠近植株基部附近出现一次大风速值, 尔后又复减小, 至粗糙高度处降为零。这种铅直分布特点对各种作物是共同的。它反映了作物群落对动量的水平和铅直输送的综合影响。

3. 根据本文分析并结合实际观测资料, 提出一种描述农田植被中风速分布的通用模式为

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \left[\alpha \cdot e^{-\alpha x} + \beta (1-f) \right]$$

和

$$u = u_H \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln H - \ln z_0} \left[\alpha \cdot e^{-\alpha x} + \beta (1-f) \right]$$

按该模式计算的风廓线和水平分布曲线, 与实测结果较为一致。

参 考 文 献

- [1] 翁笃鸣等, 套作农田小麦玉米共生期通风透光条件分析, 南京气象学院学报, 1979年第1期。
[2] 内岛, 水稻小气候, 上海农科院情报所科技译刊, 1978. 9。
[3] 内岛善兵衛, 群落内の風速と乱れ, 農業気象ハンドブック, 東京。養賢堂発行, P 213, 1974。
[4] Mayer, H., Characteristics of the vertical windprofile within and above a spruce forest, *Agri. Met.*, 19, No. 4, P275—293, Aug. 1978.
[5] Inon, E., On the turbulent structure of airflow within crop canopies, *J. Met. Soc. Japan*, 41, No. 6, P317—326, 1964.
[6] Cionco, R. M., A Mathematical model for air flow in a vegetative canopy, *J. Appl. Met.*, 4, 1965.
[7] Goudriaan, J., Crop micrometeorology, a simulation study Wageningen Centre for agricultural publishing and documentation, P 110, 1977.

WIND REGIME BENEATH CROP CANOPIES
AND ITS MODEL

Weng Du-ming Shen Jue-cheng Qian Lin-qing
Chen Wen-long Gao Jia-biao
(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract

The characteristic features of horizontal and vertical wind-speed distribution beneath crop canopy are discussed. It is found that there exists an asymmetric "S" pattern vertical profile. Deficiency of commonly used models of horizontal and vertical profiles inside crops is also analysed. A new model describing wind speed inside crops is proposed on basis of theoretical analysis and empirical fitting. According to this new model the computed mean wind speed, whether in horizontal distribution or along vertical profile, is fairly good conformity with the real data.