

东北林网地区廓线分布和湍流输送特征*

刘树华 张霭琛

(北京大学地球物理系, 北京 100871)

朱廷曜 孔繁智

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110015)

提 要 本文根据在林网内和旷野对照点草地的温、湿、风廓线和湍流观测资料, 就林网对廓线分布规律的影响和湍流输送特征进行了分析。结果表明: 林网对近地面层风速的减弱, 及增温增湿是明显的。林网地区近地面层存在空气动力学异常现象, 其高度可达到或超过树高的 3—4 倍。林网对边界层的影响高度可达 8—10 倍树高, 并且对风廓线的影响要比对温度和水汽压廓线的影响更为明显。林网地区湍流宏观统计量 σ_w/u 、 σ_v/u 和 σ_w/u 比 Panofsky 和 Dutton (1984)^[1] 著作中归纳的平原地区的结果系统偏低 6—8%。 σ_T/T 的拟合系数旷野点比林网内大 30% 左右。在相同稳定度参数 ξ 值时, 林网内近地面层的感热通量明显比旷野对照点草地上大。

关键词 林网地区 风、温、湿廓线 感热通量

1 引言

近 20 年来, 人们对单条林带和森林地区的湍流输送和微气象效应的研究已经不少。近期 Mcnanghton(1988)^[2] 发表了这方面的具有代表性的研究成果。他的研究工作虽然比较全面, 但却仅限于单条林带的研究成果。

近 10 年来, 我国三北防护林体系已形成了较大面积的农、牧防护林、固沙林、林草地等, 不仅改善了小气候条件, 对于中尺度的地方气候也有明显的影响。林网地区边界层内气流受多层林带的阻挡和扰动作用, 使廓线分布规律和湍流输送特征必将与单条林带、单个网格和树木密集的森林地区有很大的差别。因此, 在林网地区其冠层上、下能否观测到比较有规律性的廓线和湍流结构是一个重要课题。目前, 有关的全面而详实的研究还未见报道。为了揭示林网化地区防护林生态系统边界层物理特征, 研究防护林防护效应的物理机制, 为了营造不同目的防护林提供相应的优化设计指标和理论依据, 北京大学地球物理系和中国科学院沈阳应用生态研究所, 在国家自然科学基金委的资助下, 于 1989 年 5 月 10 日至 6 月 5 日, 在我国东北大面积防护林地区进行了大气边界层和湍流观测研究。

2 实验设施及观测过程

林网网格内观测场设在我国东北吉林省乾安县境内大面积防护林地区, 属我国“三

* 国家自然科学基金资助项目。

来稿日期: 1992 年 5 月; 收到修改稿日期: 1993 年 9 月。

北”防护林农业主要防护区。林网均由 8 年生杨树组成,观测网格西面有生长均匀的 25 条平行林带,再往西约 10km 始达林缘。林网主带(SN 方向)长 1 300m,由株距 1m,行距 3m 的 6 行杨树组成。副带(EW 方向)长 250m,由株距 1m,行距 3m 的 13 行杨树组成,林带平均高度约 9m,属通风结构林带。

近地面层温、湿、风廓线和湍流测量由安装在观测网格内距西林带 10H(H 为树高),南林带 30H 处的高 20m 的铁塔上观测。其中超声风速脉动仪(日本海上电机株式会社产)、温度脉动仪(自制)等安装高度为 20m 和 4m。风速分量和温度等脉动信号,采用美国 Recal Dane 公司生产的七通道模拟磁带机记录。近地面层和边界层温度、水汽压和风速、风向廓线用美国产系留控空系统测量。

对照点设在林网观测点以西(主导风向)20km 外的草原上。超声风速脉动仪和温度脉动仪安装在 11m 的铁塔顶端。超声风速脉动仪、温度脉动仪及温度、水汽压和风廓线测量设备与林网内相同,只是草原上超声风速仪为单向的(只测 W 方向的 W', DAT-100 型)。

林网内和对照点为同步观测。

3 结果分析

3.1 廓线特征

在资料处理分析中,为了消除个别廓线观测的偶然误差,得到能充分反映对照点和林网下垫面特征的具有代表性的廓线日变化过程。我们对观测期间每天的廓线资料分为 7 个时段,即 02—05,06—08,09—11,17—18,19—20 和 22—24h,并逐时逐段平均。从对照点和林网内逐时逐段平均后得到的温度、水汽压和风速廓线比较可见,对照点草原上的温度、水汽压和风速廓线没有发现异常(突然转折)的现象。而林网内则不然,除了对流混合较充分的 09—18h 以外,在其余时间的温度廓线,在树高位置以上存在一转折点,这是由于冠层上下的扰动强度的不同而导致的。

此时,对应风速廓线,林带高度以下的风速值比白天对流旺盛时一般小 1—2m/s。另外还发现,风速廓线的异常现象最为明显(与温度和水汽压廓线比较),几乎全天的风速廓线在树高附近都出现转折点。这说明林网冠层上下存在着两种不同的动力过程。

由于水汽压梯度很小,分析中很难从水汽压廓线上分辨出异常现象。

廓线分析中还发现,林网对近地面层有明显的增温、增湿和减弱风速的作用。林网内树高以下,一般比旷野草原上温度廓线高出 1—3℃,水汽压廓线高出 1—2hPa,风速廓线减弱 1—2m/s。特别是在对流旺盛的 13—15h,温度廓线高出 3.1℃,水汽压廓线高出 2hPa。

为了分析在不同稳定程度下,林网对温度和风速廓线的影响。我们以 8—16m 气层的理查孙数为指标,将廓线分为 6 种稳定度类型,即,极不稳定($Ri \leq -0.20$);不稳定($-0.20 \leq Ri < -0.10$);较不稳定($-0.10 \leq Ri < -0.02$);近中性($-0.02 \leq Ri < 0.02$);较稳定($0.02 \leq Ri < 0.20$);稳定($Ri > 0.20$)。并分别记作,A,B,C,D,E 和 F 类。分析中发现,在 A,B 类,由于对流的充分发展,必将促使垂直交换尺度和强度加大,树冠上下气流贯通,使温度和风速廓线垂直分布均匀,而不出现由于树冠对气流阻挡形成的转折点。廓线形状近

似平坦地形上的情况。而在 C、D、E 和 F 类稳定度情况下,由于垂直交换强度不足以突破由于树冠部分对气流的阻挡作用所引起的动量损耗,树冠层上下交换不畅通,故温度和风速廓线在树冠位置出现转折点。树冠以上气流的空气动力学特征取决于林网化区域大小、林网高度、林带的疏透度等。

上述廓线资料仅能显示林网对 2 倍树高以下气层的影响,并且林网间局地因素影响较大。大面积林网边界层中廓线的作用,则需通过系留气球探测获得其廓线资料。图 1 和图 2 分别给出了代表不稳定条件和稳定条件下的边界层水汽压、温度和风速廓线的典型曲线。

由图 1 可见,在不稳定条件下,从 20m 高处往上,风速廓线值比较离散,说明该大气层具有较强的扰动,该扰动层从 08h 开始到中午前后可达 200m 以上,并具有近似为零的风速梯度值。温度和水汽压廓线因受动力扰动的影响梯度也很小。

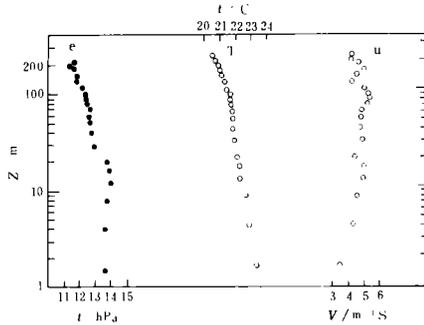
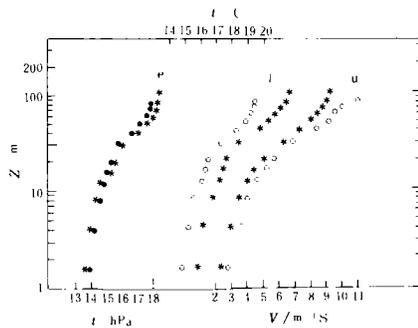


图 1 林网地区温度、水汽压和风速廓线(1989-05-24-16:20)

Fig. 1 The profiles of temperature, vapor pressure and wind speed into the windbreak network area(16:20, 24 May 1989)



(○为 1989-05-24-22:00; ×为 1989-05-24-23:00)

图 2 林网地区温度、水汽压和风速廓线

Fig. 2 The profiles of temperature, vapor pressure and wind speed in the windbreak network area(○ 22:00, 24 May 1989; × 23:00, 24 May 1989)

日落以后,风速廓线由 10m 高处逐渐转为风速切变极强的低空急流,17h 其层顶约在 50m 高度处。由图 2 可见,到了 22h 已达到 100m 左右,层顶的风速绝对达到 9.4m/s,而 23h 达到 11.3m/s,观测中发现瞬时最大值可达 17m/s。由于系留飞艇绳索的抗风性能有限,夜间凌晨前,低空急流最终能达到的强度及其高度没有得到实测资料。

由图 2 还可看出,伴随低空急流的存在,同时也明显地存在温度和水汽压梯度。并且,

水汽压廓线随时间的变化小于温度和风速廓线。

3.2 湍流无因次标准差

根据 Monin-Obukhov 相似理论,在近地面层中,风速分量和温度脉动无因次标准差 σ_u/u_* 、 σ_v/u_* 、 σ_w/u_* 和 σ_T/T_* 仅为稳定度参数 $\frac{Z}{L}$ 的函数。L 为 Monin-Obukhov 长度。

$$L = u_*^2 T / k \cdot g \cdot T_* \quad (3-1)$$

式中, k —长曼常数, g —重力加速度, $\xi = \frac{Z}{L}$ 。

在近地面层,空气层不稳定达到对流状态时,控制湍流脉动以及相应引起的动量传输机制将主要受控于浮力因子。由能量平衡方程可得^[3]:

$$\sigma_u/u_* = A(-\xi)^{1/3} \quad (3-2)$$

$$\sigma_v/u_* = B(-\xi)^{1/3} \quad (3-3)$$

$$\sigma_w/u_* = C(-\xi)^{1/3} \quad (3-4)$$

近中性条件下,无因次特征量分别近似为一常数,即 $\sigma_u/u_* \doteq A$, $\sigma_v/u_* \doteq B$, $\sigma_w/u_* \doteq C$ 。此结论已被许多平坦均一下垫表面观测结果所证实。Panofsky 和 Dutton^[1]的著作中归纳了这方面的研究结果,得到其值分别为: $A = 2.39 \pm 0.03$, $B = 1.92 \pm 0.05$, $C = 1.25 \pm 0.03$ 。本文林网内 20m 处的结果为: $\sigma_u/u_* = 2.25$, $\sigma_v/u_* = 1.80$, $\sigma_w/u_* = 1.15$ 。与之相比,系统偏低 6—8%,而林网内 4m 处的 $\sigma_w/u_* = 1.60$, 偏高 28%。这表明在不稳定层结时,林网下层湍流输送受局地影响较强,垂直脉动速度谱的分析也证实了这一结果。对照点草地上 $\sigma_w/u_* = 1.24$, 与前人在平坦草地所得结果基本一致。

Panofsky 和 Teunekes(1977)^[4]等人推荐了上述 3 个无因次特征量在不稳定层结时与稳定度参数的关系如下:

$$\sigma_u/u_* - \sigma_v/u_* = 2.29(1 - 0.22\xi)^{1/3} \quad (3-5)$$

$$\sigma_w/u_* = 1.25(1 - 3\xi)^{1/3} \quad (3-6)$$

本文所得结果如图 3 所示。根据图 3 的双对数坐标系,在 $\xi < -0.03$ 之后的直线来看,线的斜率满足 $\frac{1}{3}$ 次幂规律,但拟合所得方程中的系数与公式(3-5)和(3-6)中的系数有较大差别,拟合关系式为

$$\text{旷野点:} \quad \sigma_w/u_* = 1.24(1 - 7.8\xi)^{1/3} \quad (3-7)$$

$$\text{林网内 4m:} \quad \sigma_w/u_* = 1.60(1 - 12.7\xi)^{1/3} \quad (3-8)$$

$$\text{林网内 20m:} \quad \sigma_w/u_* = 1.15(1 - 8.2\xi)^{1/3} \quad (3-9)$$

$$\sigma_v/u_* = 1.80(1 - 7.6\xi)^{1/3} \quad (3-10)$$

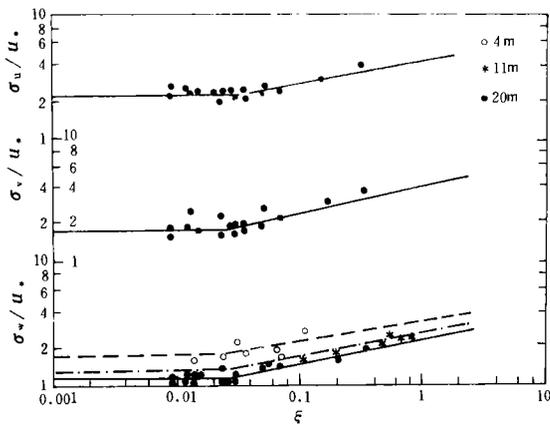
$$\sigma_u/u_* = 2.25(1 - 4.2\xi)^{1/3} \quad (3-11)$$

上述旷野点结果表明, σ_w/u_* 值在稳定度因子的影响上要强于 Panofsky 和 Teunekes 等人(1977)^[4]推荐的平坦草地上的结果。这可能是由于旷野点下垫面为盐碱黑钙土上长有稀疏浅草而热力影响较平坦草地为大所致。

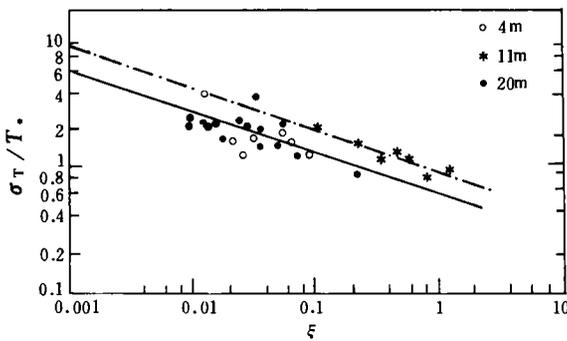
上述由林网地区所得结果说明, σ_w/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_u/u_* 值随不稳定度的增大,受稳定度因子的影响要强于平坦地区的情况,特别对水平分量则更为显著。

对无因次温度脉动标准差值 σ_T/T_* , 在对流状态下表达式可写为

$$\sigma_T/T_* = \alpha(-\xi)^{-\frac{1}{3}} \quad (3-12)$$

图3 σ_u/u_* , σ_v/u_* 和 σ_w/u_* 与 ξ 的关系Fig. 3 The relationship between σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* and ξ

Wyngarrd 等人^[3]和 Monji^[5]得到的 α 值分别为 0.95 和 0.90。本文的结果如图 4 所示。拟合得到旷野点草地 α 值为 0.92, 而林网内 4m 和 20m 的 α 值分别为 0.58 和 0.60, 几乎为一条拟合斜线。从而可看出林网下垫面对温度脉动的局地影响。

图4 σ_T/T 与 ξ 的关系Fig. 4 The relationships between σ_T/T and ξ

3.3 感热通量

感热通量是描述近地面层湍流输送的主要特征量。图 5 给出了三个测量高度的感热通量与局地稳定度参数 ξ 的关系。

从图 5 可见, 在林网内两个高度上, 随着局地不稳定性的增加, 湍流热通量迅速增加。而在旷野点草地上则不如林网内明显。但在很不稳定情况下, 湍流热通量随局地稳定度参数变化缓慢是一致的。并且, 这一现象与许多平坦地形的观测结果一致。这可能是在很不稳定的情况下, 近地面层的湍涡已超过树的高度, 树冠的阻挡影响不再起作用的结果。

另外, 图 5 还反映出林网上、下层的湍流热通量都较旷野草地上大。这说明大面积林网的存在有使林网地区近地面层湍流热通量增大的作用, 这与无因次湍流热通量谱的计算结果一致。

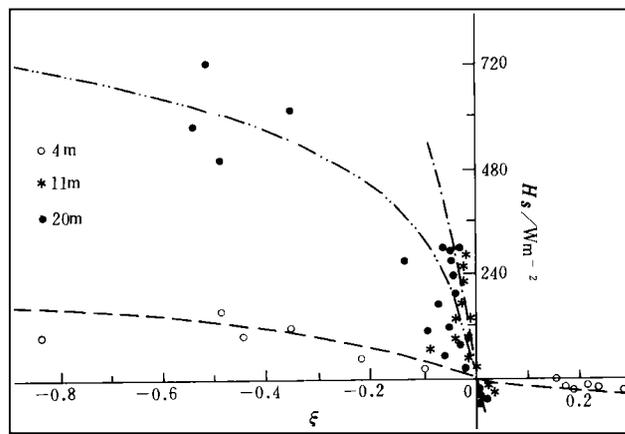


图5 感热通量与稳定度参数 ξ 的关系

Fig. 5 The relationships between sensible heat flux and stability parameter ξ

4 结论与讨论

(1) 林网对廓线的影响高度一般可达到树高的3—4倍,甚至可达到10倍上下。在对流条件下,林网冠层上下湍流输送贯通,具有很强的扰动,使廓线梯度很小。

(2) 由于林网对边界层中气流的阻力作用,除极不稳定条件时,一般使廓线在林网高度处出现空气动力学异常现象(廓线呈转折)。

(3) 林网化地区近地面层(两倍树高以下)具有明显的增温、增湿和减弱风速的作用。一般平均增温1—3℃,增湿1—2hPa,风速减弱1—2m/s。

(4) 林网内近地面层湍流无因次特征量的标准差 σ_w/u_* 、 σ_v/u_* 和 σ_u/u_* 受局地稳定度参数 ξ 的影响大于均匀平坦地形的结果,特别在水平方向更为明显。

(5) 林网内近地面层湍流热通量随局地不稳定性的增加而迅速增加。而旷野点草地上则不如林网内明显。在很不稳定条件下,林网内和旷野点湍流热通量随局地稳定度参数变化较小,但林网内仍比旷野点大4倍,这充分说明了林网下垫面对近地面层湍流热通量的增大作用。

参 考 文 献

- 1 Panofsky H A, Dutton J A. Atmospheric turbulence. New York: John Wiley and Sons, 1984, 156-226.
- 2 Menaughton K G. Effects of windbreaks on turbulent transport and microclimate, *Agric. Ecosys and Environ.*, 1988, **22-23**: 17-39.
- 3 Wyngard J C, Cote O R et al. Local free convection similarity and the budgets of shear stress and heat flux. *J. Atmos. Sci.*, 1971, **28**: 1171-1182.
- 4 Panofsky H A, Lenschow D H et al. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Bound. Layer Meteorol.*, 1977, **11**: 350-361.
- 5 Monji N. Budgets of turbulent energy and temperature variance in the transition zone from forced to free convection. Ph. D. Thesis, University of Washington, 1972.

CHARACTERISTICS OF ON THE DISTRIBUTIVE PATTERN OF PROFILES AND TURBULENT FLUX TRANSFER IN THE WINDBREAK NETWORK AREA

Liu Shuhua Zhang Aichen

(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871*)

Zhu Tingyao Kong Fanzhi

(*Institute of Applied Ecology Academia Sinica, Shenyang 110015*)

Key words windbreak network area, wind, temperature and humidity profiles, turbulent flux

Abstract

In this paper, using the data of the profiles and atmospheric turbulence and analyzed characteristics of on the distributive pattern of wind speed, temperature, vapor pressure profiles and turbulent flux transfer. The data are collected below and above the canopy of the forest in the windbreak network area. The average height of the trees is 9m. A 20m gradient observation tower and a tether-sonder are used for measuring the profiles, and two set of the atmospheric turbulence instrument are installed at the heights of 4m and 20m in the windbreak network. As the contrast, a same set of the instruments is also installed in the grassland. A 11m gradient observation tower and a tether-sonder are used for measuring the profiles, and a set of the atmospheric turbulence instruments is installed at the height of 11m in the grassland. The results show that (1) The thickness of the internal boundary layer is about 8—10 times as much as the tree height. (2) The effects of windbreak network on decreasing wind speed and increasing temperature and humidity are obvious in the windbreak network area. (3) The result is 6—8 per cent less than the values of σ_w/u_* , σ_v/u_* and σ_h/u_* . Given by Panofsky and Dutton (1984) for flat terrain area. (4) The flux profile relationship could not be applied to the windbreak area, because the assumption of constant flux in the surface layer is not suitable for this area. (5) The influenced layer could be divided into two layers: the layer which is about the tree's top and has with dense leaves; and the layer of the internal boundary layer with its thickness about 100m. (6) The sensible heat flux is obviously greater in the windbreak network region than in the grassland under the same conditions stability.

作者简介

刘树华,男,1952年生,副教授。1977年毕业于北京大学地球物理系大气物理专业,留校任教。从事大气物理、大气边界层、大气湍流探测及数值模拟的教学和科研工作。发表“防护林地区近地面层湍流结构”和“Radiation Balance and Turbulent flux Characteristics in Antarctica”等论文 30 余篇。