

孙鹏飞, 范广洲, 王寅钧, 等, 2022. 小兴安岭森林下垫面湍流特征研究[J]. 气象, 48(8): 1020-1031. Sun P F, Fan G Z, Wang Y J, et al, 2022. Research on turbulence characteristics of forest underlying surface in Xiaoxing'an Mountains[J]. Meteor Mon, 48(8): 1020-1031(in Chinese).

小兴安岭森林下垫面湍流特征研究*

孙鹏飞^{1,2} 范广洲³ 王寅钧⁴ 王超³ 曲哲^{2,3} 马宏达^{1,5}

1 五营国家气候观测台, 丰林 153036

2 黑龙江省伊春市气象局, 伊春 153000

3 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

5 黑龙江省丰林县气象局, 丰林 153036

提 要: 利用中国气象局五营森林生态监测站内梯度观测塔上的涡度相关资料, 分析森林下垫面湍流动力特征(湍流强度、湍流标准差等), 并计算了零平面位移(d)、空气动力粗糙度长度(z_0)和动量拖曳系数(C_D)。结果表明: 研究区域全年以西南风为主, 仅在夏季出现较多东北风。生长季(5—9月)湍流强度较强, 非生长季(10月至次年4月)湍流强度较弱, 水平风速的平均湍流强度为 0.4, 垂直风速的平均湍流强度为 0.16。 d 和 z_0 均有明显的季节变化, 且一致表现为生长季高, 非生长季低的趋势, d 和 z_0 平均值分别为 18.56 m 和 1.21 m。不稳定条件时, 三维风速的标准差均符合 1/3 次方相似规律; 近中性条件时, 无量纲三维风速标准差 σ_i/u_i ($i=u, v, w$)在春季分别为 2.81、2.73、1.20, 夏季为 2.62、2.53、1.10, 秋季为 2.63、2.51、1.14, 冬季为 2.74、2.54、1.17。温度和湿度的标准差在不稳定条件符合 1/3 次方相似规律, 春季拟合的系数分别为 2.06 和 2.67, 夏季为 2.45 和 2.18, 秋季为 1.94 和 2.85, 冬季为 1.96 和 3.00。 C_D 在弱不稳定达到峰值, 整体平均值为 9.8×10^{-3} , 随粗糙度近似呈线性增长。

关键词: 森林下垫面, 湍流强度, 相似理论, 零平面位移, 粗糙度

中图分类号: P425.2

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.032102

Research on Turbulence Characteristics of Forest Underlying Surface in Xiaoxing'an Mountains

SUN Pengfei^{1,2} FAN Guangzhou³ WANG Yinjun⁴ WANG Chao³ QU Zhe^{2,3} MA Hongda^{1,5}

1 Wuying National Climate Observatory, Heilongjiang, Fenglin 153036

2 Yichun Meteorological Office of Heilongjiang Province, Yichun 153000

3 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 Fenglin Weather Station of Heilongjiang Province, Fenglin 153036

Abstract: Using the vorticity-related data collected from the gradient observation tower in the Wuying Forest Ecological Monitoring Station of China Meteorological Administration, this paper addresses the turbulence characteristics of the underlying surface of the forest (turbulence intensity, turbulence variance, etc.), and calculates the zero-plane displacement (d), the roughness length (z_0) and the momentum drag coefficient (C_D). The results indicate that southwest wind prevails almost throughout the year, with

* 国家重点研发计划(2018YFC1507301)、四川省科技厅项目(2019YJ0360)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034)和黑龙江省气象局青年基金项目(HQJJ2021022)共同资助

2021年4月29日收稿; 2022年3月21日收修定稿

第一作者: 孙鹏飞, 主要从事事大气边界层、灾害性天气研究. E-mail: beyondfei@126.com

northeast wind only in summer. The turbulence intensity during the growing season (May—September) is stronger, turbulence intensity during the non-growing season (October—April) is weaker, the average turbulence intensity of the horizontal wind speed is 0.4, and the vertical wind speed is 0.16. Both d and z_0 have obvious seasonal changes, and they consistently show a trend of high in the growing season but low in the non-growing season, with the average values of d and z_0 being 18.56 m and 1.21 m, respectively. Under unstable conditions, the standard deviation of wind speed all conforms to 1/3 power similar law; when nearing neutral conditions, the dimensionless three-dimensional wind speed standard deviation σ_i/u_* ($i=u, v, w$) are 2.81, 2.73, 1.20 in spring; 2.62, 2.53, 1.10 in summer; 2.63, 2.51, 1.14 in autumn; and 2.74, 2.54, 1.17 in winter. The standard deviations of temperature and humidity conform to $-1/3$ power similar law under unstable conditions, the coefficients for spring fitting are 2.06 and 2.67, 2.45 and 2.18 in summer, 1.94 and 2.85 in autumn, 1.96 and 3.00 in winter, respectively. C_D reaches its peak value in weak instability, and the overall average is 9.8×10^{-3} , increasing approximately linearly with roughness.

Key words: forest underlying surface, turbulent intensity, similarity theory, zero-plane displacement, roughness length

引言

大气边界层是指距离地面 1~2 km 的大气层最底下的一个薄层,它是大气与下垫面直接发生相互作用的层次,它与天气、气候以及大气环境研究有非常密切的关系。地面和大气间进行着动量、水汽、热量和物质交换与湍流输送,其过程直接影响和决定大气边界层的形成和发展,进一步影响气候变化和大气环境等。过去的一个世纪,地球气候经历了以变暖为主要特征的显著变化,由此而导致的海平面升高,冰川退缩,湖泊水位下降以及越来越频繁的严重自然灾害给人类生存和社会安全造成了极大的威胁(郭建侠,2006)。森林作为陆地生态系统的主体,是地球生物圈的重要组成部分。森林植被改变了下垫面的物理特征,直接影响辐射平衡、热量平衡、水量平衡和湍流通量等,形成特有的小气候特征,并与大气以湍流的形式不断进行动量、热量和水分交换(张一平等,2006; Mengesha et al, 2015; 谢馨瑶等, 2018),其不仅具有改善和维护区域生态环境的功能,而且在调节全球气候、维持全球碳平衡等方面具有不可替代的作用(蔡慧颖, 2017)。

近些年,国内外众多学者对森林生态系统的湍流特征进行了大量研究(Pita et al, 2013; Richardson et al, 2010)。刘和平等(1997)通过对长白山森林生态定位研究站内气象塔上湍流及风廓线资料计算了长白山森林空气动力学粗糙度长度(z_0),零平面位移(d)及曳力系数(C_D)、热力输送系数(C_H),并

对误差进行了分析。刘树华等(2003)利用观测的湍流资料,在对森林冠层上下的速度分量和温度谱、局地各向同性、湍流能量和热量归一化耗散率特征研究的基础上,首次给出了森林冠层上的湍流特征长度尺度、湍流动量和热量耗散率、湍流动量和热量结构参数的特征。李萍阳等(2002)通过对美国威斯康星州北部的 Chequamegon 国家森林的两个气象塔塔层湍流测量值和特征分布,计算分析得出森林的拖曳系数较以往的平坦地形大得多;与平坦地形相比,森林及林木湿地下垫面的湍流强度较大,且湍流强度随高度增加而减弱;森林的无量纲风速标准差小于林木湿地,无量纲风速标准差随高度增加而增大。刘罡等(2006)研究表明水汽和二氧化碳浓度的湍流标准差相似函数比温度要分散,并且独立于稳定度,说明在森林冠层上空的大气湍流运动中,热量、水汽和二氧化碳的输送是互不相似的,并对这种不相似现象的可能原因进行了初步的研究和探索。王春林等(2007)应用最小二乘法和能量平衡比率两种方法,系统分析了广东省鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡特点,并分析各种涡度通量修正方法对能量平衡的影响。赵晓松等(2004)利用廓线法中的牛顿迭代法计算了森林下垫面的零平面位移(d)和空气动力学粗糙度长度(z_0),结果显示 d 在生长季较大、 z_0 较小,而在非生长季刚好相反。

小兴安岭地处北温带大陆性季风气候区,是以阔叶红松林为代表的针阔叶混交林区,是国家重点林区之一,也是中国天然林生态系统的核心区域之一,植被固碳潜力巨大,在中国森林碳汇中占有重要

地位(赵溪竹,2010)。但到目前为止,国内对于小兴安岭的湍流特征尚未进行深入研究。因此,对小兴安岭地区的湍流特征进行深入、细致的研究十分必要,无论是为数值模式的发展提供基础,还是对政府决策部门提供相应依据都有重要意义。

本文利用中国气象局五营森林生态监测站内梯度观测塔上的 2016 年 12 月至 2017 年 11 月一年的涡度相关资料,研究小兴安岭森林下垫面湍流的基本特征,为提高对小兴安岭森林下垫面湍流输送特征及陆气物质与能量交换的规律和机理特征的认识提供基础。

1 观测场地、仪器简介

五营镇位于汤旺河上游地段,小兴安岭南坡腹部,全境地貌除汤旺河沿岸有少量冲积开阔地外,绝大部分属小兴安岭山地。整个地势呈东南略高、西北略低、山地居多、平原较少、地势平缓,属于低山丘陵地带。五营镇属北温带大陆性季风气候,年平均气温为 0.6°C ,年降水量为 610.7 mm ,年日照时数为 2196.0 h ,无霜期为 117 d ,大于或等于 10°C 的积温为 2141.8°C ,全年以西南风和偏南风为主导风向。五营原始阔叶红松林面积达 3.2 hm^2 ,有“红松故乡”之称。

观测场地为中国气象局五营红松林野外生态监测站(海拔高度为 342 m),距离五营镇西北方向

10 km 。站内建有面积为 $50\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的梯度观测场,位于次生针阔叶混交林中,平均树高约为 $23\sim 25\text{ m}$ (图 1)。观测场附近地势略有起伏,整体表现为北高南低(图 1a)。

观测场内建有一个 70 m 高的梯度观测塔, 50 m 高度处设涡度测量系统,由数据采集器(Li-7550, Li-cor, USA)、三维超声风速仪(WindMaster, Gill, USA)、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-7550, Li-cor, USA)组成,用于地气间 CO_2 、 H_2O 、动量、显热、潜热和三维风速等要素的监测及森林生态系统碳循环的研究。

2 观测资料及数据质量控制方法

以 $\xi=z/L$ 表示大气稳定度, $z/L>0$ 为稳定大气, $z/L<0$ 为不稳定大气。 z 为仪器测量高度,对于森林下垫面,需要引入零平面位移(d),以高度 $z-d$ 置换高度 z (Kustas and Brutsaert, 1986; 张宏昇, 2014); L 为莫宁-奥布霍夫长度,计算公式如下:

$$L = -u_*^3/k \frac{g}{\theta} \overline{w\theta'} \quad (1)$$

$$u_* = [(\overline{u'w'^2}) + (\overline{v'w'^2})]^{1/4} \quad (2)$$

式中: θ 为虚位温, u_* 为摩擦速度, k 为卡曼常数(取 0.4), g 为重力加速度, u, v, w 为坐标旋转后的顺风、侧风、垂直向风速(Stull, 1991)。

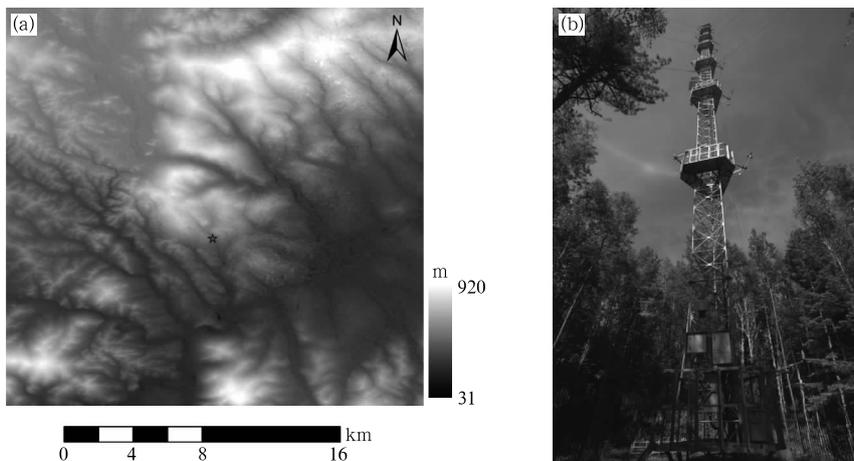


图 1 五营森林生态监测站梯度观测塔(a)位置和(b)周围环境
(★为梯度塔位置)

Fig. 1 (a) The location and (b) surrounding environment of the gradient observation tower (★) at Wuying Forest Ecological Monitoring Station

非中性条件下的近地层风速廓线公式为 (Stull, 1991):

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{k} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) + \Psi_M \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \quad (3)$$

式中: z_0 为空气动力粗糙度长度, 定义为风速为零的高度。 Ψ_M 为稳定度函数, 在稳定和不稳定条件下可分别表示为:

$$\Psi_M \left(\frac{z-d}{L} \right) = \frac{4.7(z-d)}{L} z/L > 0 \quad (4)$$

$$\Psi_M \left(\frac{z-d}{L} \right) = -2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) - \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) + 2 \tan^{-1} \left(x - \frac{\pi}{2} \right) z/L < 0 \quad (5)$$

式中: $x = [1 - (15z/L)]^{3/4}$ 。

根据莫宁-奥布霍夫相似理论, 任何一个量的标准差被特征尺度参数标准化后就被成为 z/L 的普适函数 (Andreas et al, 1998)。根据经验拟合与局地自由对流假设 (张宏昇, 2014):

$$\sigma_X / X_* = \phi_X (z/L) = C_{X1} (1 - C_{X2} |z/L|)^{\pm 1/3} \quad (6)$$

式中: σ_X 为 X 的标准差, X 指 u, v, w 、温度 T 、比湿 q , X_* 是 X 的特征尺度参数 (对于速度分量, $X_* = \overline{w'X'}/u_*$; 对于其他变量, $X_* = -\overline{w'X'}/u_*$), ϕ_X 为普适函数, C_{X1}, C_{X2} 为经验常数 (Stull, 1991)。

当 $-z/L \rightarrow \infty$, 边界层处于自由对流状态时, 对于其他变量, 式(6)可简化为:

$$\sigma_X / X_* = \phi_X (z/L) = C_X (-z/L)^{\pm 1/3} \quad (7)$$

引入温度尺度 ($T_* = -\overline{w'T'}/u_*$) 和湿度尺度 ($q_* = -\overline{w'q'}/u_*$), 根据式(6)和式(7), 对于无因次化温度标准差 σ_T/T_* 和无因次化湿度标准差 σ_q/q_* , 在对流状态下可以表达为:

$$\sigma_T / |T_*| = C_T (-z/L)^{-1/3} \quad (8)$$

$$\sigma_q / |q_*| = C_q (-z/L)^{-1/3} \quad (9)$$

式中: C_T 和 C_q 为拟合确定的参数 (Stull, 1991)。

观测资料选取 2016 年 12 月至 2017 年 11 月一年的数据 (因仪器故障原因, 9 月 5—9 日、10 月 11—18 日、10 月 30 日至 11 月 1 日数据缺测), 并假定 50 m 位于常通量层。使用 Eddypro 软件对 10 Hz 的原始数据进行处理, 具体处理流程参照王寅钧等 (2013)、龚玺等 (2018)、孙鹏飞等 (2021)。

对 Eddypro 软件输出的 30 min 数据进行以下筛选: ①剔除仪器出错时的数据; ②剔除夜间弱湍流的观测数据 ($u_* < 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); ③计算 z_0, d, C_D 时剔除弱风数据 ($u \leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 筛选大气稳定度范

围为 $|z/L| \leq 10$ 。

3 结果分析

3.1 风向、风速特征

研究湍流的一般方法, 是把温度和风等变量分解为平均和扰动两部分。平均部分表示平均温度和平均风速的影响, 扰动部分则表示波的影响或叠加在平均风速上的湍流影响。因此, 了解平均场的特征是研究湍流运动及其物质和能量交换的前提。研究区域春、秋和冬季 (图 2a, 2c, 2d) 以西南风为主, 其次为偏西风 and 偏南风; 夏季以西南风为主, 其次为东北风 (图 2b); 总体上全年基本为偏西到偏南风, 西北方向和东南方向的风很少。从图 2 中的风速分布可以看到, 整个观测期间以 $0 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风速最多, 其次是 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 较少, $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上风速接近于无, 表明观测期间主要以小风环境为主, 强风环境很少。

3.2 湍流强度

湍流强度 ($I_a = \sigma_a / \bar{u}$) 指被水平风速标准化后的标准差 ($\alpha = u, v, w$), σ_a 为相应风速分量的标准差, \bar{u} 为平均风速 (Stull, 1991)。观测区域不同月份 u, v, w 方向湍流强度特征如下 (表略): 10 月至次年 4 月 u, v 方向湍流强度较弱, 在 $0.32 \sim 0.40$, 5—9 月 u, v 方向湍流强度较强, 在 $0.40 \sim 0.50$; 垂直方向各月差异和水平方向较为一致, 10 月至次年 4 月 w 方向湍流强度在 $0.14 \sim 0.16$, 5—9 月在 $0.17 \sim 0.20$ 。水平风速的年平均湍流强度为 0.4 , 垂直风速的年平均湍流强度为 0.16 。

3.3 零平面位移和粗糙度

根据式(3)~式(5)进行迭代拟合, 得到 10 d 平均的标准化零平面位移 (d/h) 和粗糙度长度 (z_0/h) 的时间序列 (图 3) (其中 h 为林木平均高度, 取值为 23 m)。 d/h 和 z_0/h 均有明显的季节变化, 且一致表现为生长季高, 非生长季低的趋势, 这与赵晓松等 (2004) 认为的 d 和 z_0 呈相反趋势有很大不同。具体表现为: ① 2016 年 12 月至 2017 年 4 月, 为林木非生长季, 叶片脱落, d/h 和 z_0/h 较小, 平均值分别为 0.67 和 0.049 ; ② 2017 年 5 月至 9 月下旬, 为林木生长旺季, 叶片密度增加, 使得 d/h 和 z_0/h 迅速增大, 平均值分别为 0.966 和 0.056 ; ③ 2016 年

10—11月,进入非生长季, d/h 和 z_0/h 平均值分别降到0.749和0.051。 d 和 z_0 平均值分别为18.56 m和1.21 m,与刘和平等(1997)($d=19.5\pm 1.38$ m, $z_0=1.60\pm 0.25$ m)和赵晓松等(2004)(d/h 值为

0.642~0.861, z_0/h 值为0.0466~0.0736)在长白山森林下垫面(平均树高为26 m)的计算结果较为接近。

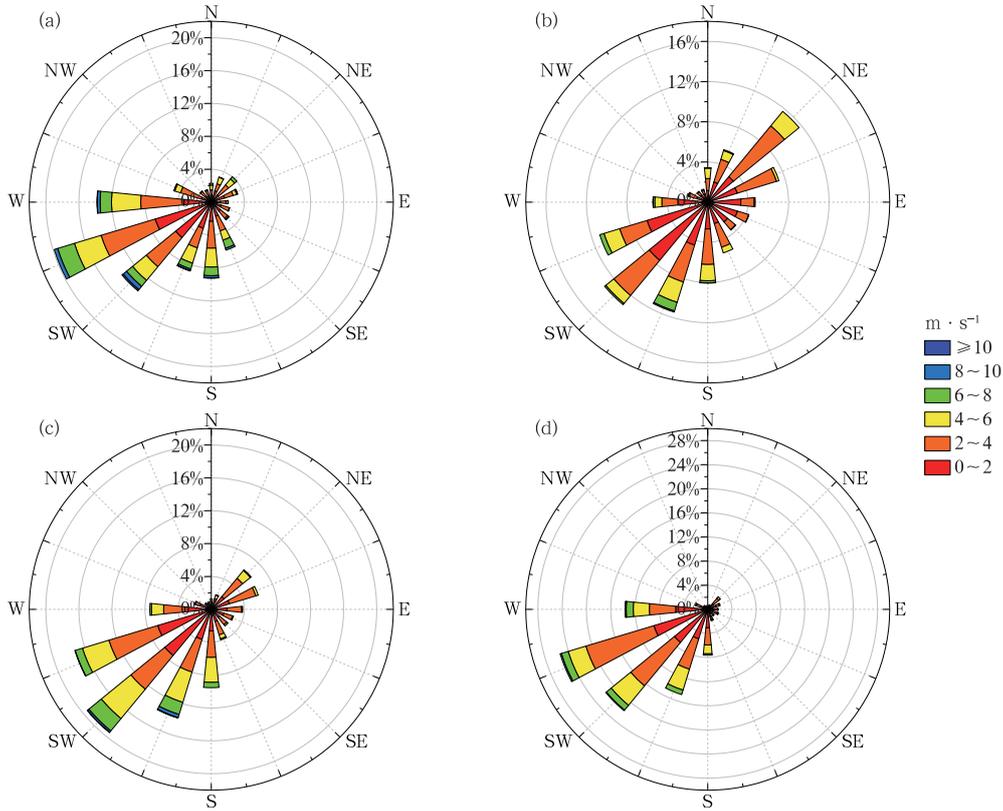


图2 2016年12月至2017年11月五营森林监测站各季节风向和风速分布
(a)春季,(b)夏季,(c)秋季,(d)冬季

Fig. 2 Distributions of wind direction and wind speed in each season at Wuying Forest Ecological Monitoring Station from December 2016 to November 2017
(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

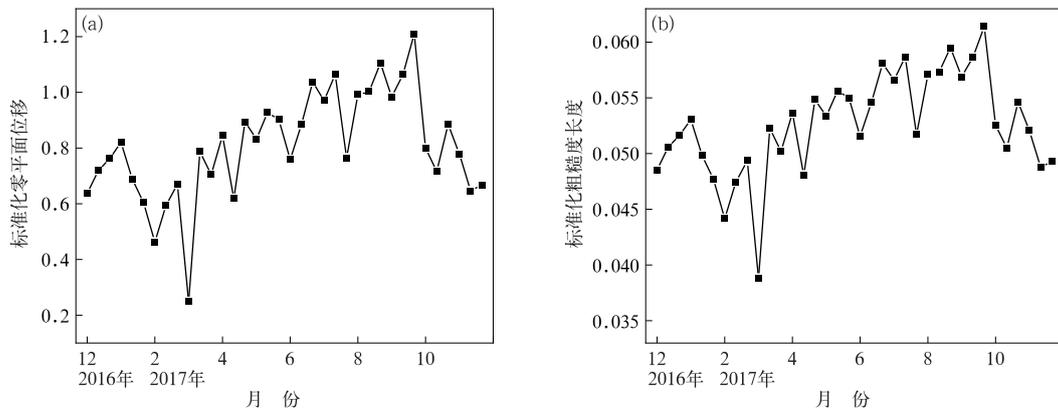


图3 2016年12月至2017年11月五营森林监测站10 d平均的(a)标准化零平面位移 d/h 和(b)标准化粗糙度长度 z_0/h 的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of 10 d averaged (a) d/h and (b) z_0/h at Wuying Forest Ecological Monitoring Station from December 2016 to November 2017

3.4 无量纲风速标准差随稳定度变化特征

图 4 显示,无论夏季还是冬季,观测区风速标准差在 $z/L < 0$ 不稳定条件下均满足 1/3 方相似规律,且经验常数 $C_{u1} \approx C_{v1} > C_{w1}$,在接近中性条件时趋于常数,在稳定和稳定条件情况时,随着稳定度增大,湍流离散度增大。观测区在不稳定条件时无量纲风速标准差表现为(表略):经验常数 C_{u1} 在春季最大、夏季最小,经验常数 C_{v1} 在春季最大、秋季最小,经验常数 C_{w1} 在春季最大、夏季最小。从表 1 中可以看到高原、草原、沙漠相对于其他下垫面 C_{u1}

和 C_{v1} 较大,而 C_{w1} 相差不大,说明地形作用对垂直方向的湍流运动影响较小。另外,相对于其他地区的森林下垫面,本文的 C_{u1} 和 C_{v1} 更大一些, C_{u1} 和 C_{v1} 大小主要反映局地观测点周围地形的影响(张艳武等,2009),和前文描述的观测区附近的复杂的地形相符合。

3.5 无量纲温度、湿度标准差随稳定度变化特征

在不稳定条件下(图 5a,5c), $\sigma_T / |T_*|$ 随 z/L 变化基本满足 $-1/3$ 次方相似规律,在强不稳定层结自由对流条件时,两者的拟合关系更为明显。越

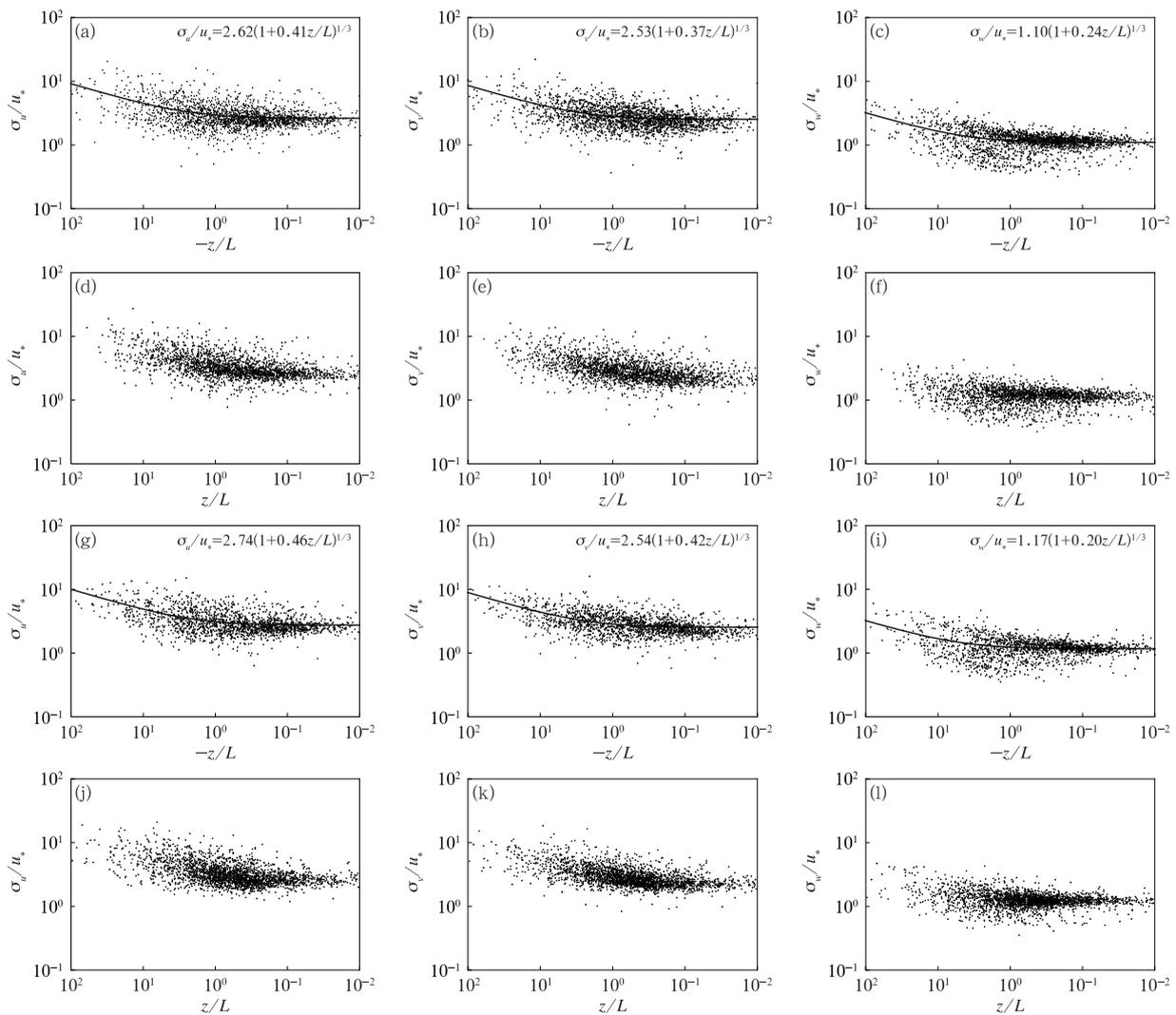


图 4 2016 年 12 月至 2017 年 11 月(a~f)夏季,(g~l)冬季五营森林监测站无量纲水平风速分量标准差: (a,d,g,j) σ_u/u_* 和 (b,e,h,k) σ_v/u_* 以及 (c,f,i,l) 垂直风速标准差 (σ_w/u_*) 与稳定度 (z/L) 的关系 (a~c, g~i) 不稳定情况, (d~f, j~l) 稳定情况

Fig. 4 Relationship between dimensionless horizontal wind speed component variances: (a, d, g, j) σ_u/u_* and (b, e, h, k) σ_v/u_* and (c, f, i, l) vertical wind speed standard deviation (σ_w/u_*) and stability (z/L) at Wuying Forest Ecological Monitoring Station in (a~f) summer and (g~l) winter from December 2016 to November 2017 (a~c, g~i) unstable conditions, (d~f, j~l) conditions

表 1 不同地区近中性条件下无量纲风速分量标准差

Table 1 Dimensionless wind speed component variance under near-neutral conditions in different regions		C_{u1}	C_{v1}	C_{w1}
	测站			
	本站(夏季)	2.62	2.53	1.10
森林地区	美国威斯康星州北部国家森林(李萍阳等,2002)	2.00	1.56	1.15
	黄河小浪底(夏季)(张功等,2018)	2.04	2.62	1.57
	长白山(8月)(许俊卿等,2014)	1.89	1.99	1.21
城市	北京 325 m 气象塔(47 m)(Liu et al.,2017)	2.14	1.61	1.17
青藏高原	大理(7月)(王寅钧,2014)	2.96	2.85	0.95
	当雄(陈陟等,2002)	3.40	2.45	1.15
绿洲	额济纳绿洲(张艳武等,2009)	1.97	2.05	1.13
沙漠	巴丹吉林沙漠北缘拐子湖(7月)(郑新倩等,2019)	2.76	2.51	1.02
平原地区	河北固城(郭建侠,2006)	2.20	2.00	1.02
草原	锡林浩特(30 m)(王丙兰等,2012)	2.81	3.04	0.97

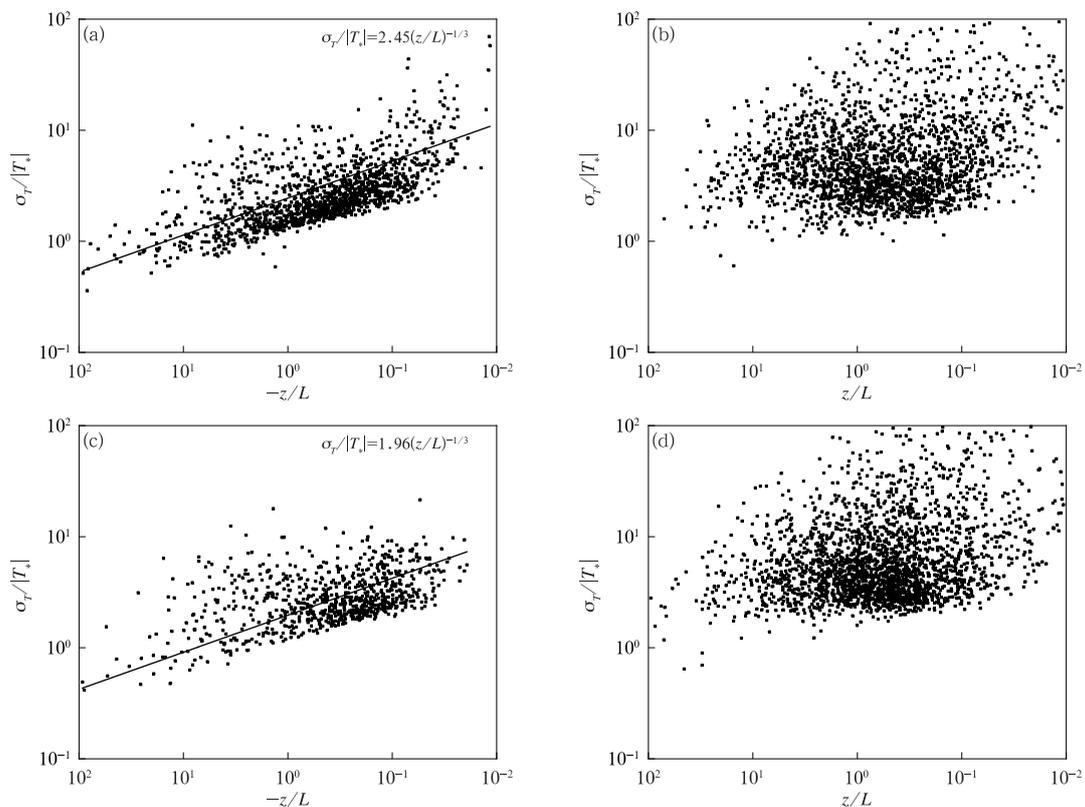


图 5 2016 年 12 月至 2017 年 11 月(a,b)夏季,(c,d)冬季五营森林监测站无因次温度标准差($\sigma_T/|T_*|$)与稳定度(z/L)的关系
(a,c)不稳定情况,(b,d)稳定情况

Fig. 5 Relationship between dimensionless temperature standard deviation ($\sigma_T/|T_*|$) and stability (z/L) at Wuying Forest Ecological Monitoring Station in (a, b) summer, (c, d) winter from December 2016 to November 2017
(a, c) unstable conditions, (b, d) stable conditions

接近中性条件,点的离散度越大,主要是因为此时热通量接近于零,难以被测量且测量误差较大(张艳武等,2009)。春、秋、冬季拟合参数 C_T 的差异不大(表略),分别为 2.06、1.94、1.96,夏季拟合参数 C_T

相对较大,为 2.45。在稳定条件下(图 5b,5d), $\sigma_T/|T_*|$ 随 z/L 不满足 $-1/3$ 次方相似规律,点较为离散。强稳定和强不稳定层结时, $\sigma_T/|T_*|$ 的值均较小,随着稳定度向中性条件靠近, $\sigma_T/|T_*|$ 的值

逐渐增大。

在不稳定条件下(图 6a,6c), $\sigma_q/|q_*|$ 随 z/L 变化也基本满足 $-1/3$ 次方相似规律,但湿度标准差离散程度明显大于温度标准差。春、夏、秋、冬季拟合参数 C_q 的差异较明显(表略),分别为 2.67、2.18、2.85、3.00。在稳定条件下(图 6b,6d), $\sigma_q/|q_*|$ 随 z/L 也不满足 $-1/3$ 次方相似规律,点相对温度标准差更为离散,与张艳武等(2009)的结果较为一致。

从表 2 不同地区不稳定条件下拟合的系数 C_T

和 C_q 可见,不同下垫面 C_T 和 C_q 相差较大,其中本站 C_T 小于美国威斯康星州北部国家森林的森林下垫面(李萍阳等,2002)和河北固城平原下垫面(郭建侠,2006),大于其他下垫面, C_q 没有明显的比较规律。以上特征不仅与下垫面有关,还和不同观测高度以及不同观测季节和气候条件都有很大关系。

3.6 湍流输送系数

总体输送系数包括动量拖曳系数系数(C_D)、热量输送系数(C_H)和水汽输送系数(C_E),它们是陆面

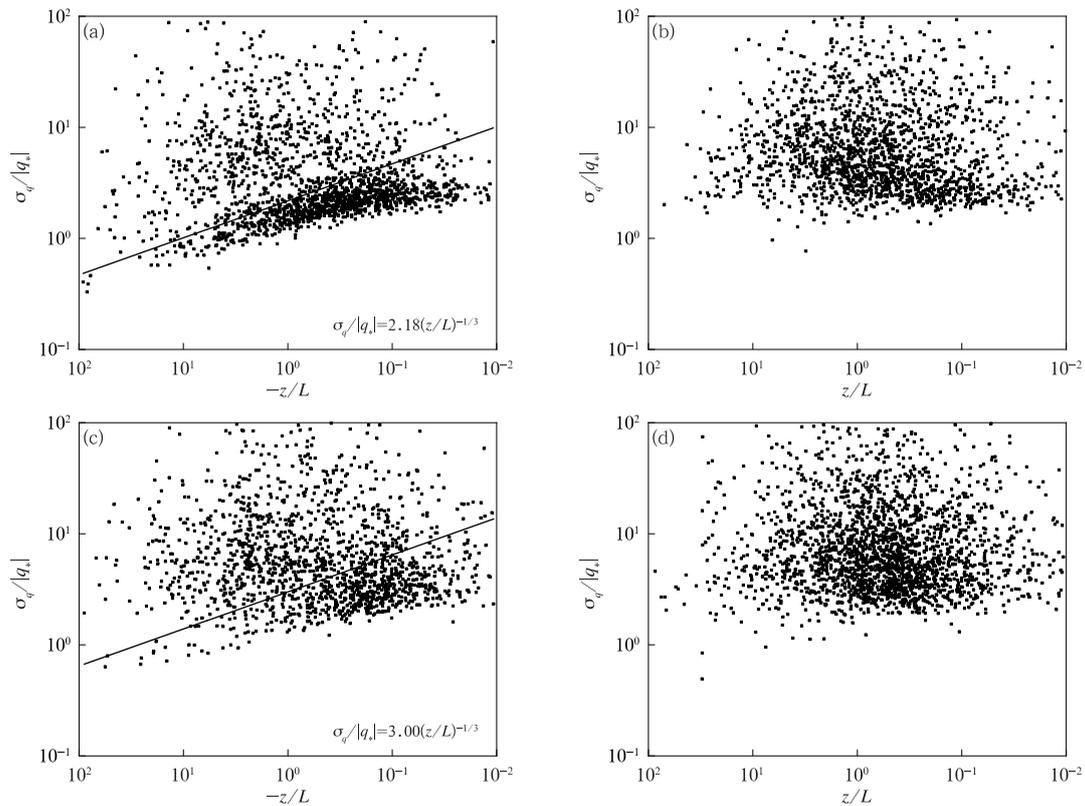


图 6 同图 5,但为无因次湿度标准差($\sigma_q/|q_*|$)与稳定度(z/L)的关系

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for relationship between dimensionless humidity standard deviation ($\sigma_q/|q_*|$) and stability (z/L)

表 2 不同地区不稳定条件下拟合的系数 C_T 和 C_q

Table 2 Fitting coefficients C_T and C_q under unstable conditions in different regions

测站		C_T	C_q
	本站(夏季)	2.45	2.18
森林地区	美国威斯康星州北部国家森林(李萍阳等,2002)	2.94	29.36
城市	北京 325 m 气象塔(47 m)(Liu et al,2017)	1.25	4.20
青藏高原	大理(7月)(王寅钧,2014)	1.11	2.81
	当雄(陈陟等,2002)	1.25	1.27
绿洲	额济纳绿洲(张艳武等,2009)	1.95	2.45
平原地区	河北固城(郭建侠,2006)	3.00	3.42
草原	锡林浩特(30 m)(王丙兰等,2012)	1.03	1.22

过程中计算不同下垫面地-气间物质和能量交换的重要参数,因此,获得准确的总体输送系数是陆面过程参数化研究的关键(王慧等,2008;张海宏等,2019)。本文采用涡动相关法对 C_D 进行计算:

$$C_D = \frac{u_*^2}{U^2} \quad (10)$$

式中 U 为通量塔 50 m 高度处的平均风速。

如图 7 所示,与其他下垫面研究中(Wang et al,2016)认为的 C_D 随着不稳定性的增加而单调增加不同,本文中 C_D 先从强不稳定到弱不稳定逐渐升高,直到达到弱不稳定条件的峰值($z/L \approx -0.47$)后,再随稳定度的增加而减小,这与 Srivastava and Sharan(2015)的研究相似。经计算,当大气处于不稳定时($z/L < 0$), C_D 平均值为 13.6×10^{-3} ,近中性时($-0.1 < z/L < 0.1$), C_D 平均值为 13.6×10^{-3} ,稳定时($z/L > 0$), C_D 平均值为 7.3×10^{-3} ,整体 C_D 平均值为 9.8×10^{-3} 。本文计算出的 C_D 值相比其他下垫面较大(王慧等,2008),可能是研究区地形起伏,森林冠层的粗糙程度在各个季节变化较大,从而对各个方向的湍流风速造成较大影响(张功等,2018)。

图 8 给出了 C_D 与风速之间的关系。在不稳定情况下,当风速较低时,大气湍流主要以热力湍流为主,因此冠层以上大气处于局地自由对流状态,此时会导致 C_D 较大;而随着风速增加,湍流的剪切作用

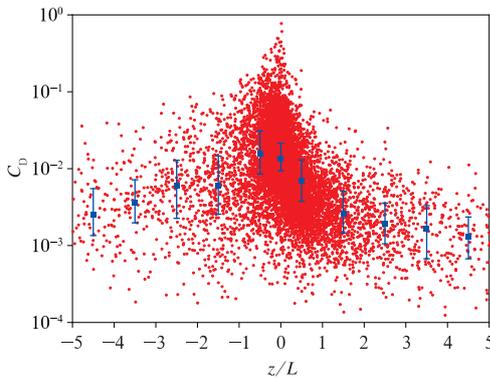


图 7 2016 年 12 月至 2017 年 11 月五营森林监测站动量拖曳系数(C_D)与稳定度(z/L)的关系(矩形为中位数,上限为 75% 处值,下限为 25% 处值)
Fig. 7 Relationship between momentum drag coefficient and stability at Wuying Forest Ecological Monitoring Station from December 2016 to November 2017 (The rectangle is median, and the upper limit is 75% value, the lower limit is 25% value)

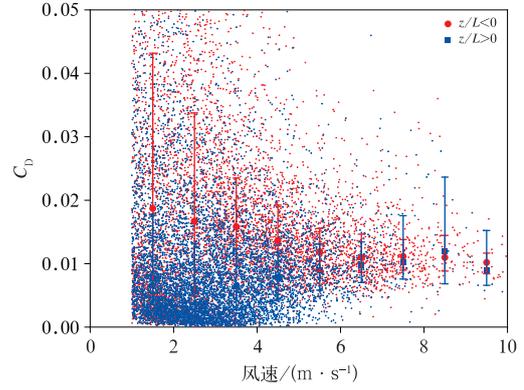


图 8 2016 年 12 月至 2017 年 11 月五营森林监测站不同稳定度条件动量拖曳系数(C_D)与风速的关系(点/矩形为中位数,上限为 75% 处值,下限为 25% 处值)
Fig. 8 Relationship between momentum drag coefficient and wind speed under different stability conditions at Wuying Forest Ecological Monitoring Station from December 2016 to November 2017 (The point/rectangle is median, and the upper limit is 75% value, the lower limit is 25% value)

增强,风切变的增加会产生更多的机械湍流(Wang et al,2015),使 C_D 逐渐减小,当风速超过 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, C_D 随风速的变化变得很小。在稳定情况下,在低风速时, C_D 随风速而增加,随着风速增大,大气层结逐渐变为中性, C_D 变得稳定。 z_0 是影响 C_D 的重要因子(王慧等,2008),图 9 中显示 C_D 随 z_0 的增加而增加,且近似呈线性变化。

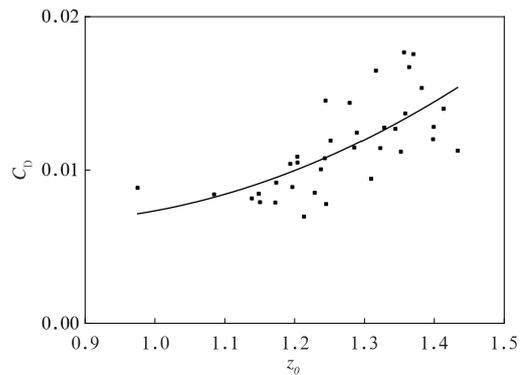


图 9 2016 年 12 月至 2017 年 11 月五营森林监测站动量拖曳系数(C_D)与粗糙度(z_0)的关系
Fig. 9 Relationship between momentum drag coefficient and roughness at Wuying Forest Ecological Monitoring Station from December 2016 to November 2017

4 结 论

利用中国气象局五营森林生态监测站内梯度观测塔上的2016年12月至2017年11月的湍流相关资料,分析小兴安岭森林下垫面的风向、风速特征,主要研究近地层湍流动力特征(湍流强度、湍流方差等),并对空气动力学参数(d 、 z_0 和 C_D)进行了计算。主要结论如下:

(1)研究区整个观测期间以 $0\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速最多,夏季以西南风为主,其次为东北风;春、秋、冬季风向以西南风为主,其次为偏西风 and 偏东风;全年基本为偏西到偏南风,西北方向和东南方向的风很少。 u 、 v 、 w 方向的湍流强度均在5—9月较强,在10月至次年4月较弱。水平风速的平均湍流强度为0.4,垂直风速的平均湍流强度为0.16。

(2)研究区 d 和 z_0 均有明显的季节变化,且一致表现为生长季高,非生长季低的趋势, d 和 z_0 平均值分别为18.56 m和1.21 m,与长白山森林下垫面的结果接近。

(3)在不稳定条件,各个季节的风速标准差均符合 $1/3$ 次方相似规律,且 $C_{u1}\approx C_{v1}>C_{w1}$,夏季近中性条件,无量纲三维风速标准差 σ_i/u_* ($i=u, v, w$)为2.62、2.53、1.10;温度和湿度的标准差在不稳定条件符合 $-1/3$ 次方相似规律,夏季拟合的系数分别为2.45和2.18,在稳定条件不符合相似规律,且湿度相对温度较为离散。在近中性条件时, σ_u/u_* 和 σ_v/u_* 值相对高原、草原、沙漠和极地下垫面较小,比其他下垫面和其他地区的森林下垫面大,而 σ_w/u_* 相差不大。

(4)本文中 C_D 先从强不稳定到弱不稳定逐渐升高,直到达到弱不稳定条件的峰值($z/L\approx -0.47$)后,再随着稳定度的增加而减小,当大气处于不稳定时($z/L<0$), C_D 平均值为 13.6×10^{-3} ,近中性时($-0.1<z/L<0.1$) C_D 平均值为 13.6×10^{-3} ,稳定时($z/L>0$)平均值为 7.3×10^{-3} ,整体平均值为 9.8×10^{-3} 。在不稳定情况下,当风速较低时, C_D 较大,而随着风速增加, C_D 逐渐减小,当风速超过 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, C_D 随风速的变化变得很小。在稳定情况下,在低风速时, C_D 随风速而增加,随着风速增大,大气层结逐渐变为中性, C_D 变得稳定。 C_D 随粗糙度近

似呈线性增长。

本文采用梯度观测塔50 m处的湍流观测资料进行分析,由于观测塔只有一层湍流观测系统,且各层梯度数据误差较大,无法验证50 m高度处是否存在常通量层,文中假定50 m位于常通量层,后续会对此进行深入分析。文中采用50 m处的湍流观测资料对 d 和 z_0 进行了计算,得出的结果和其他研究结果较为相似,但是在个别月份 d 数值偏大,可能与计算方法有关,也可能和观测场地附近的地形有关,需要进行更加深入的分析。

致 谢:感谢中国气象局沈阳大气环境研究所提供了研究所需的数据,数据来源于“东北地区生态与农业气象野外科研试验基地”。

参考文献

- 蔡慧颖,2017.小兴安岭典型森林生态系统的碳储量与生产力[D].哈尔滨:东北林业大学. Cai H Y,2017. Carbon storage and productivity for typical forest ecosystems in Xiaoxing'an Mountains, China[D]. Harbin:Northeast Forestry University(in Chinese).
- 陈陟,周明煜,李诗明,等,2002.我国西部高原地区近地层湍流特征的研究[J].地球物理学报,45(增刊):93-105. Chen Z, Zhou M Y, Li S M, et al,2002. Characteristics of the turbulence in the surface layer over the plateau of western China[J]. Chin J Geophys,45(S):93-105(in Chinese).
- 龚玺,朱蓉,李泽椿,2018.我国不同下垫面的近地层风切变指数研究[J].气象,44(9):1160-1168. Gong X, Zhu R, Li Z C,2018. Study of near-surface wind shear exponents of different regions in China [J]. Meteor Mon,44(9):1160-1168(in Chinese).
- 郭建侠,2006.华北玉米下垫面湍流输送特征及参数化方案比较研究[D].南京:南京信息工程大学. Guo J X,2006. Characters and parameterization comparisons of turbulent transfer over maize field on North China Plain[D]. Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 李萍阳,蒋维楣,苗世光,2002.森林及林木湿地上空近地层大气湍流特性的观测分析[J].南京大学学报(自然科学版),38(4):583-592. Li P Y, Jiang W M, Miao S G,2002. Observational analysis on turbulent characteristics of the atmospheric surface layer above forest and wetland-forest[J]. J Nanjing Univ (Nat Sci), 38(4):583-592(in Chinese).
- 刘和平,刘树华,朱廷曜,等,1997.森林冠层空气动力学参数的确定[J].北京大学学报(自然科学版),33(4):522-528. Liu H P, Liu S H, Zhu T Y, et al,1997. Determination of aerodynamic parameters of Changbai Mountain forest[J]. Acta Sci Nat Univ Pek, 33(4):522-528(in Chinese).
- 刘树华,胡非,刘辉志,等,2003.森林冠层上湍流尺度、耗散率和湍流结构参数[J].北京大学学报(自然科学版),39(1):73-82. Liu S

- H, Hu F, Liu H Z, et al, 2003. Turbulence length scales, dissipation rates and structure parameters above the forest canopy[J]. *Acta Sci Nat Uni Pek*, 39(1): 73-82(in Chinese).
- 刘罡, 李昕, 蒋维楣, 等, 2006. 森林冠层上空标量的湍流-方差关系不相似原因的探析[J]. *自然科学进展*, 16(7): 907-911. Liu G, Li X, Jiang W M, et al, 2006. Analysis of the dissimilar causes of the turbulence-variance relationship of the scalar over the forest canopy[J]. *Prog Nat Sci*, 16(7): 907-911(in Chinese).
- 孙鹏飞, 范广洲, 曲哲, 等, 2021. 小兴安岭近地层湍流能谱特征[J]. *高原气象*, 40(2): 374-383. Sun P F, Fan G Z, Qu Z, et al, 2021. Characteristics of surface-layer turbulence spectra in Xiaoxing'an Mountains[J]. *Plateau Meteor*, 40(2): 374-383(in Chinese).
- Stull R B, 1991. 边界层气象学导论[M]. 杨长新, 译. 北京: 气象出版社, 1-738. Stull R B, 1991. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*[M]. Yang C X, trans. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 王丙兰, 胡非, 程雪玲, 等, 2012. 边界层局地相似理论在草原下垫面的适用性检验[J]. *高原气象*, 31(1): 28-37. Wang B L, Hu F, Cheng X L, et al, 2012. Suitability of local similarity of boundary layer in homogeneous grassland underlying surface[J]. *Plateau Meteor*, 31(1): 28-37(in Chinese).
- 王春林, 周国逸, 王旭, 等, 2007. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统能量平衡分析[J]. *热带气象学报*, 23(6): 643-651. Wang C L, Zhou G Y, Wang X, et al, 2007. Energy balance analysis of the coniferous and broad-leaved mixed forest ecosystem in Dinghushan [J]. *J Trop Meteor*, 23(6): 643-651(in Chinese).
- 王慧, 李栋梁, 胡泽勇, 等, 2008. 陆面上总体输送系数研究进展[J]. *地球科学进展*, 23(12): 1249-1259. Wang H, Li D L, Hu Z Y, et al, 2008. A review of the study of the bulk transfer coefficients over the land[J]. *Adv Earth Sci*, 23(12): 1249-1259(in Chinese).
- 王寅钧, 2014. 青藏高原东南缘大理边界层参数化与湍流特征影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Wang Y J, 2014. *Boundary layer characteristics and turbulent parameterization in southeastern side of Tibetan Plateau Dali*[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 王寅钧, 周明煜, 徐祥德, 等, 2013. MM5 和 ETA 相似理论近地层方案对农田下垫面通量模拟比较研究[J]. *气象学报*, 71(4): 677-691. Wang Y J, Zhou M Y, Xu X D, et al, 2013. Comparative study of the similarity surface layer schemes simulate turbulent flux simulations over cropland between MM5 and ETA[J]. *Acta Meteor Sin*, 71(4): 677-691(in Chinese).
- 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安, 2018. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述[J]. *生态学报*, 38(1): 41-54. Xie X Y, Li A N, Jin H A, 2018. The simulation models of the forest carbon cycle on a large scale: a review[J]. *Acta Ecol Sin*, 38(1): 41-54(in Chinese).
- 许俊卿, 陈蓓莹, 隋晓霞, 2014. 森林近地层大气湍流特性观测分析[J]. *干旱气象*, 32(1): 1-9. Xu J Q, Chen B Y, Sui X X, 2014. Observational analysis on turbulent characteristics of the atmospheric surface layer above forest[J]. *J Arid Meteor*, 32(1): 1-9(in Chinese).
- 张功, 郑宁, 张劲松, 等, 2018. 人工林冠层的湍流微气象特征[J]. *应用生态学报*, 29(6): 1787-1796. Zhang G, Zheng N, Zhang J S, et al, 2018. Turbulence micro-meteorological characteristics over the plantation canopy[J]. *Chin J Appl Ecol*, 29(6): 1787-1796(in Chinese).
- 张海宏, 姜海梅, 周秉荣, 等, 2019. 玉树隆宝 2014 年冬季冻土积雪对陆气通量关键参数的影响分析[J]. *气象*, 45(11): 1550-1559. Zhang H H, Jiang H M, Zhou B R, et al, 2019. Impact analysis of frozen soil and snow on key parameters of land atmosphere flux at Longbao, Yushu in winter 2014 [J]. *Meteor Mon*, 45(11): 1550-1559(in Chinese).
- 张宏昇, 2014. 大气湍流基础[M]. 北京: 北京大学出版社. Zhang H S, 2014. *Basics of Atmospheric Turbulence*[M]. Beijing: Peking University Press(in Chinese).
- 张艳武, 黄静, 吴统文, 2009. 黑河下游额济纳绿洲近地层湍流输送特征研究[J]. *气象学报*, 67(3): 433-441. Zhang Y W, Huang J, Wu T W, 2009. A study on the boundary layer turbulence transfer over the Ejina Oasis in the lower reach of the Heihe River [J]. *Acta Meteor Sin*, 67(3): 433-441(in Chinese).
- 张一平, 宋清海, 于贵瑞, 等, 2006. 西双版纳热带季节雨林风时空变化特征初步分析[J]. *应用生态学报*, 17(1): 11-16. Zhang Y P, Song Q H, Yu G R, et al, 2006. Temporal-spatial characteristics of wind in tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna of Yunnan Province[J]. *Chin J Appl Ecol*, 17(1): 11-16(in Chinese).
- 赵溪竹, 2010. 小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳库及其周转[D]. 哈尔滨: 东北林业大学. Zhao X Z, 2010. *Soil organic carbon pool and turnover of main forest community type in Xiaoxing'an Mountains*[D]. Harbin: Northeast Forestry University(in Chinese).
- 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等, 2004. 长白山阔叶红松林的零平面位移和粗糙度[J]. *生态学杂志*, 23(5): 84-88, 115. Zhao X S, Guan D X, Wu J B, et al, 2004. Zero-plane displacement and roughness length of the mixed forest of broad-leaved and Korean-pine in Changbai Mountain[J]. *Chin J Ecol*, 23(5): 84-88, 115(in Chinese).
- 郑新倩, 杨帆, 李超凡, 等, 2019. 巴丹吉林沙漠北缘拐子湖流沙下垫面近地层湍流强度和陆面过程特征[J]. *中国沙漠*, 39(4): 103-112. Zheng X Q, Yang F, Li C F, et al, 2019. The turbulence intensity of surface layer and land surface processes over Guaiji Lake shifting sandy land on the northern margin of Badain Jaran Desert[J]. *J Desert Res*, 39(4): 103-112(in Chinese).
- Andreas E L, Hill R J, Gosz J R, et al, 1998. Statistics of surface-layer turbulence over terrain with metre-scale heterogeneity[J]. *Bound-Layer Meteor*, 86(3): 379-408.
- Kustas W P, Brutsaert W, 1986. Wind profile constants in a neutral atmospheric boundary layer over complex terrain[J]. *Bound-Layer Meteor*, 34(1-2): 35-54.

- Liu Y, Liu H Z, Wang L, 2017. The vertical distribution characteristics of integral turbulence statistics in the atmospheric boundary layer over an urban area in Beijing[J]. *Sci China Earth Sci*, 60(8):1533-1545.
- Mengesha T, Hawkins M, Tarleton M, et al, 2015. Stem quality assessment using terrestrial laser scanning technology; a case study of ash trees with a range of defects in two stands in Ireland[J]. *Scand J Forest Res*, 30(7):605-616.
- Pita G, Gielen B, Zona D, et al, 2013. Carbon and water vapor fluxes over four forests in two contrasting climatic zones[J]. *Agric Forest Meteorol*, 180:211-224.
- Richardson A D, Black T A, Ciais P, et al, 2010. Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity [J]. *Phil Trans Roy Soc B: Biol Sci*, 365(1555):3227-3246.
- Srivastava P, Sharan M, 2015. Characteristics of the drag coefficient over a tropical environment in convective conditions[J]. *J Atmos Sci*, 72(12):4903-4913.
- Wang Y J, Xu X D, Liu H Z, et al, 2016. Analysis of land surface parameters and turbulence characteristics over the Tibetan Plateau and surrounding region[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 121(16):9540-9560.
- Wang Y J, Xu X D, Zhao T L, et al, 2015. Structures of convection and turbulent kinetic energy in boundary layer over the southeastern edge of the Tibetan Plateau[J]. *Sci China Earth Sci*, 58(7):1198-1209.

(本文责编:王婷波)