

文章编号: 1004-4965 (2007) 04-0413-04

## 西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层大气稳定度 时间变化特征初探

杨振<sup>1,2</sup>, 张一平<sup>1</sup>, 于贵瑞<sup>3</sup>, 赵双菊<sup>1,2</sup>, 宋清海<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南 昆明 650223; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;  
3. 中国科学院地理科学与资源环境研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 为探讨热带季节雨林林冠上方大气稳定状态, 为通量计算提供依据, 利用 2003~2004 年热带季节雨林林冠上方的涡度相关法观测资料, 对西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层内大气的稳定度频率分布进行了分析研究。计算了稳定度参数( $z/L$ ), 并对大气稳定度类型进行了划分, 分析了大气稳定状态的时间变化。结果表明: 在热带季节雨林林冠上方的大气稳定度频率分布存在明显的日变化。昼间不稳定状态占优势, 晚上以稳定状态为主; 在早晨和下午稳定状态和不稳定状态频率分布易发生变化, 导致中性的大气稳定状态更容易出现; 而各大气稳定状态的频率分布年和季节变化相对较小, 大气不稳定状态出现频率以雾凉季最高、干热季最低; 稳定状态出现频率以干热季最高、雨季最低; 中性状态出现频率以雨季最高、雾凉季最低。

**关 键 词:** 大气稳定度; 频率分布; 时间变化; 生态边界层; 热带季节雨林

中图分类号: X16

文献标识码: A

### 1 引 言

地球表面森林冠层与大气层之间物质和能量的交换, 在生物圈相互作用及全球变化中日益受到重视。要进一步认识森林冠层在近地面层能量输送和局地生态效应中的作用, 需要对树冠上方大气的稳定状态进行研究。Jegade 等<sup>[1]</sup>分析了西非热带的低风速地区不同大气稳定状态下, 近地层参数的变化特征; Mahrt 等<sup>[2]</sup>研究了拖曳系数与大气稳定度之间的关系。在国内对森林湍流特征的研究也有报道, 但多集中在对北方森林<sup>[3-7]</sup>和防护林<sup>[8-10]</sup>的研究; 刘树华等<sup>[11]</sup>及靳建军等<sup>[12]</sup>研究了丘陵地区森林下垫面冠层以上的湍流特征长度尺度与稳定度的关系; 并对森林生态系统与大气边界层相互作用进行了数值模拟<sup>[13]</sup>; 钟中等<sup>[5]</sup>在对长白山阔叶红松林冠层的研究中发现, 不同的大气稳定层结下, 粗糙度和零平面位移也会有所不同; 对于城市大气稳定度分类国内学者也开展了一些工作<sup>[14-15]</sup>; 但对于热带地区复杂林分的研究则不多见。

植物体及其生理活动与环境之间的直接相互作用发生在生态边界层。对于植物群体冠层生态边界层而言, 生

态边界层的厚度是植物冠层顶部高度上湍流混合长的函数, 并与大气层结稳定度和植物生理活动强弱有关<sup>[16]</sup>。如何客观、合理地确定大气稳定度是长期以来人们一直研究的问题, 并且已提出多种划分稳定度等级的方法。按对资料的要求, 主要分为两类, 一类是利用常规资料划分, 如 Pasquill-Turner 方法(P-T 法); 另一类则需要边界层气象观测资料, 如理查逊数法, Monin-Obkhov(莫宁-奥布霍夫)法等<sup>[17-19]</sup>。

许多研究者以 Monin-Obkhov 理论为基础, 开展了近地层大气稳定度, 湍流结构与湍流量以及气象要素梯度的观测试验研究, 得到了许多彼此有差异的普适函数形式<sup>[21]</sup>。现今 Monin-Obkhov 相似理论的适用性问题成为研究的热点, Renia 等<sup>[22]</sup>的研究表明: Monin-Obkhov 相似理论只有在特定高度才适用, 这个高度大于粗糙长度而小于边界层深。

本研究利用中国通量观测网络(ChinaFlux)的中国科学院西双版纳热带森林通量观测站的观测数据, 应用 Monin-Obkhov 法, 计算得到稳定度参数( $z/L$ ), 确定西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层的大气稳定状态, 期为下一步进行复杂地形下大气边界层湍流研究和通量

收稿日期: 2005-08-06; 修订日期: 2007-05-31

基金项目: 中国科学院创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A); 国家重点基础研究发展计划(国家 973 项目)(2002CB412501)共同资助

作者简介: 杨振, 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向: 生态气候。E-mail: yangz@xtbg.ac.cn

计算提供科学基础。

## 2 试验场地和观测仪器

### 2.1 观测地点

西双版纳属于横断山系南端无量山脉和怒江山脉的余脉,气候属于西部型季风气候,干湿季节变化明显<sup>[23]</sup>。本区位于热带雨林的北缘,终年受西南季风控制,属热带季风气候,一年中有雾凉季(11~2月)、干热季(3~4月)、雨季(5~10月)之分<sup>[24]</sup>。观测点位于云南省西双版纳州勐腊县境内的国家级自然保护区内(21°57'N, 101°12'E, 海拔 756 m),距中国科学院西双版纳热带雨林生态系统定位研究站直线距离约 8 km。观测样地所在的热带季节雨林,林分平均高度约 35 m,郁闭度为 90%,结构复杂,分层现象明显,乔木层按高度即可分为 3 层:藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著<sup>[25]</sup>。本研究地点的粗糙度  $Z_0$  为 3.64 m,零平面位移  $d$  为 29.9 m。

### 2.2 观测仪器和资料处理

瞬时三维风速和温度及其脉动由安装在观测铁塔 48.8 m 的三维超声风速温度测定仪(CSAT3, 美国 CAMPBELL 公司)测量。为了将铁塔导致的流场变形减小到最低程度,一般将其安装在铁塔的逆风向<sup>[26]</sup>。仪器安装高度略高于树冠高度,且位于近地层内,高于粗糙长度而小于边界层深。

原始数据的记录和实时计算均由系统软件 Loggernet(美国 CAMPBELL 公司)完成。本文对 10 Hz 的原始数据采用了常用的坐标变换方法(自然风系统三次旋转, Triple-rotation tilted)对数据进行了校正,并进行了 WPL 变换,最后得到了可用的 30 min 平均的通量数据。分析中的基础数据均为 30 min 的平均值。本文选取了 2003 年 1 月 1 日~2004 年 12 月 31 日的观测数据,结合地方气候特征,对森林冠层上方生态边界层大气稳定度的时间变化特征进行分析、讨论。

## 3 计算方法

可用下式求算 Monin-Obkhov 稳定度参数

$$\frac{z}{L} = kg \frac{zT_s}{Tu_s^2} \quad (1)$$

式中  $z$  为观测高度;  $L$  表征湍流混合的垂直尺度;  $T_s$  表征湍流的温度尺度;  $u_s$  表征速度尺度<sup>[21]</sup>。根据公式(1)可计算得到  $z/L$  的值,而  $z/L$  即近地层尺度参数,它的符号与静力稳定度有关:负号意味着不稳定,正号意味着稳定。由此对  $z/L$  分类,在分析中,不稳定为  $z/L < -1$ ,中性为  $-1 < z/L < 1$ ,稳定为  $z/L > 1$ 。

## 4 结果与分析

### 4.1 林冠上大气稳定度日变化特征

热带季节雨林林冠上方 2003 年和 2004 年两年不同大气稳定状态出现频率的日变化见图 1 所示,从图中可见,从 8:00 开始林冠上大气处于不稳定状态的频率开始迅速增加,在 13:00 左右达到峰值(可达 80%以上)后,大气不稳定状态出现的频率开始迅速下降,到 18:00 不稳定状态出现频率趋于稳定。与之相对应,树冠上大气处于稳定状态的频率在 18:00 以后有明显的增加,在凌晨左右大气出现稳定状态的频率最高,之后开始逐渐降低,在 6:00 后迅速下降,在 13:00 左右降到最低(低于 5%),之后缓慢上升,而下午 16:00 以后其出现的频率又开始迅速上升。值得注意的是,林冠上方大气稳定层结出现的频率在 8:00 左右和 16:00 左右出现两个峰值,而这恰恰是树冠上大气稳定状况出现显著变化的界点。因此可以认为在 7:00~9:00 和 15:30~17:30,热带季节雨林林冠上方大气稳定度的变化最为复杂,稳定、中性和不稳定状态出现的频率均在 30%左右。可看出,整个昼间以大气不稳定状态出现频率为最高,进一步比较热带季节雨林林冠上方昼、夜间的大气稳定状态,可看出昼间大气不稳定状态出现的频率最高,而夜晚大气稳定状态出现的频率最高。

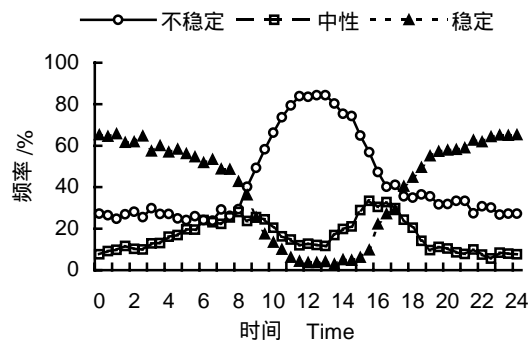


图 1 2003~2004 年大气稳定度日变化

### 4.2 林冠上大气稳定度频率分布月变化和季节变化特征

从图 2 可以看出,热带季节雨林林冠上方大气稳定状态中,中性状态出现的频率 11~2 月间比较低,从 3 月开始升高,在 7~9 月保持比较高的频率,10 月份以后开始逐渐下降。而稳定型出现的频率在 2~3 月为最高,之后开始下降,在 10 月份左右降到最低,不稳定状态出现的频率在 11~12 月比较高,7~8 月间降到最低;中性状态出现的频率以 7、8 月份最高。

由图 3 可看出各个季节林冠上方大气层结稳定状态变化的趋势基本一致。所不同的是相对于干热季和雨季,雾凉季大气不稳定状态频率占优势出现的时间晚,且持续时间短;而在干热季昼间大气稳定状态出现频率最低,且

这种状态相对其它两个季节持续时间长一些；而在雨季大气层结出现中性状态的频率比其它两个季节多。

热带季节雨林林冠上方不同的大气稳定状态在不同季节的频率分布有所不同。总的来说，不稳定状态和稳定状态所占比率均较高，且两者差异不大；而中性状态所占比率较小。其中，大气不稳定状态在雾凉季出现频率较高，干热季则有明显的下降；而大气稳定状态在干热季出现频率最高、雨季最低；中性状态在雨季出现频率最高，最低在雾凉季。

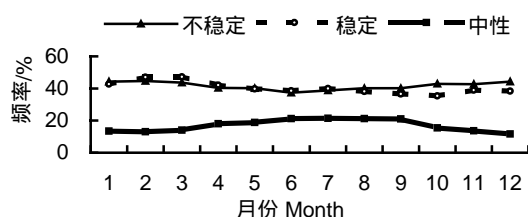


图2 大气稳定度频率分布月变化

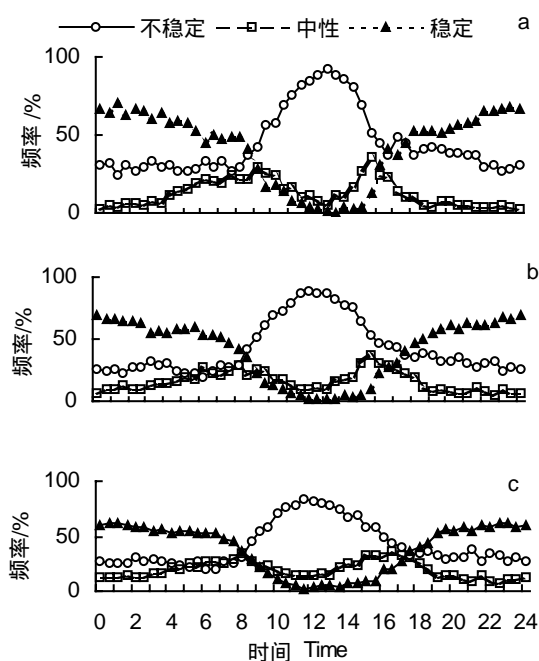


图3 大气稳定度的季节变化

a. 雾凉季；b. 干热季；c. 湿热季。

## 5 结 论

通过对西双版纳热带季节雨林树冠上大气稳定度分布规律的分析可以得到如下结论：

(1) 西双版纳热带季节雨林树冠上方生态边界层的大气稳定状态存在明显的日变化，昼间以不稳定状态为主，而晚上则以稳定状态为主。中性状态出现频率具有明显的双峰分布特征。其原因可以认为是由于夜间树冠的辐射作用，使树冠层温度低于林冠上方大气，形成逆温层，大气层结稳定。当昼间日出以后，逆温层消失，加之树冠层光合作用增强，树冠上呈现较强的热力效应<sup>[27]</sup>，植物体与大气间物质交换增强，大气更容易出现不稳定状态；下午以后，光强减弱，植物生命活动减弱，不稳定状态出现的频率有所下降。而在稳定类型频率分布发生变化的时刻更有利于中性状态出现，其表现便是大气中性状态在早晨和下午的双峰分布。

(2) 西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层的大气稳定状态同样存在月变化，大气稳定状况季节变化主要表现为在不同的季节，大气稳定度类型发生变化的时间以及分布的频率有所不同。

(3) 总的看来，西双版纳热带季节雨林树冠上生态边界层大气稳定状况昼间以不稳定状态为主（>60%），夜间以稳定状态为主（>60%），中性状态在清晨（6:00~8:00）和下午（16:00~19:00）出现频率较高，出现频率在25%~40%之间。

致 谢：在研究中得到了中国科学院西双版纳热带生态系统定位研究站的大力支持，刘梦楠同志参加了数据收集工作，在此表示感谢。

## 参 考 文 献：

- [1] JEGEDE O O, FASHEUN T A, ADEYEFA Z D, et al. The effect of atmospheric stability on the surface layer characteristics in a low-wind area of tropical west Africa[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1997, 85: 309-323.
- [2] MAHRT L, VICKERS D, SUN J, et al. Determination of the surface drag coefficient[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 249-276.
- [3] 刘和平, 朱廷曜, 孙繁智, 等. 森林冠层湍流结构的特征研究[J]. 北京大学学报：自然科学版, 1997a, 33(2): 246-253.
- [4] 刘和平, 刘树华, 朱廷曜, 等. 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, 1997b, 33(4): 522-528.
- [5] 钟中, 韩士杰. 长白山阔叶红松林冠层空气动力学参数的计算[J]. 南京大学学报, 2002, 38(4): 565-571.

- [6] ZHANG J H, YANG X M, HAN S J, et al. Dominate time scale characteristics of the turbulence across canopy-atmosphere interface of a mixed broadleaved-Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Journal of Forestry Research, 2002a, 13(3): 205-208.
- [7] ZHANG J H, DING Z H, NAN S J, et al. Turbulence regime near the forest floor of a mixed broadleaved/Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Journal of Forestry Research, 2002b, 13(2): 119-122.
- [8] 康立新, 王述礼. 沿海防护林体系功能及其效益[M]. 北京: 科学文献出版社, 1994: 41-84.
- [9] 朱廷曜. 防护林体系生态效益及边界层物理特征研究[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 27-84.
- [10] 朱廷曜, 关德新, 周广胜, 等. 农田防护林生态工程学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001: 59-202.
- [11] 刘树华, 邓毅, 胡非, 等. 森林生态系统与大气边界层相互作用的数值模拟[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2005-2012.
- [12] 靳建军, 张雷, 陈长和, 等. 低山丘陵地区大气稳定度的一些特征[J]. 甘肃环境研究与监测, 2000, 13(2): 80-84.
- [13] 刘树华, 胡非, 刘辉志, 等. 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, 2003, 39(1): 73-82.
- [14] 毕雪岩, 刘烽, 吴兑. 几种大气稳定度分类标准计算方法的比较分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 402-409.
- [15] 毕雪岩, 刘烽, 陈辉, 等. 北京地区大气稳定度垂直分布特征[J]. 热带气象学报, 2003, 19(增刊): 173-179.
- [16] 王汉杰, 王信理. 生态边界层原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 9-10.
- [17] SEDEFIAN L A. Comparison of turbulence classification schemes[J]. Atmospheric Environment, 1980, 14(1): 741-750.
- [18] 陈泮勤. 几种稳定度分类方法的比较研究[J]. 环境科学学报, 1983, 8(4): 357-363.
- [19] 曹文俊, 朱汶. 大气稳定度参数的计算方及几种稳定度分类方法的对比研究[J]. 中国环境科学, 1990, 10(2): 143-147.
- [20] 何玉贵, 黄建国, 陈长和, 等. 关于大气稳定度分类的研究[J]. 环境科学学报, 1985, 5(5): 21-27.
- [21] 傅抱璞, 翁笃鸣, 虞静明, 等. 小气候学[M]. 北京: 气象出版社, 1994: 83-137.
- [22] REINA N, SIMILARITY M L. Theory for local and spatially averaged momentum fluxes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 108(4): 265 - 279.
- [23] 朱华, 王洪, 李保贵, 等. 西双版纳热带季节雨林的研究[J]. 广西植物, 1998, 18(4): 371-384.
- [24] 张克映. 滇南气候的特征及其形成因子的初步分析[J]. 气象学报, 1966, 33(2): 210-230.
- [25] 任泳红, 曹敏, 唐建维, 等. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(5): 418-425.
- [26] VOURLITIS G L, PRIANTE N, HAYASHI M M S, et al. Seasonal variations in the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest[J]. Functional Ecology, 2001, 15(33): 388-395.
- [27] 张一平, 赵双菊, 窦军霞, 等. 热带季节雨林热力效应时空分布特征初探[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(4): 1-7.

## THE TEMPORAL VARIATION CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC STABILITY CLASSIFICATION OVER THE ECOBOUNDARY LAYER IN TROPICAL SEASONAL RAINFOREST OF XISHUANGBANNA , SW CHINA

YANG Zhen<sup>1, 2</sup>, ZHANG Yi-ping<sup>1</sup>, YU Gui-rui<sup>3</sup>,  
ZHAO Shuang-ju<sup>1, 2</sup>, SONG Qing-hai<sup>1, 2</sup>

( 1. Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, CAS, Kunming 650223, China;

2. University school of the Chinese Academic Sciences, Beijing 100039, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China )

**Abstract :** Using the data between 2003 and 2004 by three-anemometers, we discussed the frequency distribution of atmospheric stability above the tropical seasonal rainforest canopy in Xishuangbanna, Southwest China. The Monin-Obukhov length  $z/L$  has been calculated and then divided into seven parts by different conditions. The results showed that the frequency of atmospheric stability had significant daily variation. Stable condition was dominant in the day, and unstable condition mainly occurred at night. Atmospheric stability change always took place in the morning and afternoon, and growth of the frequency of near-neutral condition was observed at the same time. The results also showed that the frequency of unstable condition was the highest in foggy-cool season but the lowest in dry-hot season; the frequency of stable condition was the highest in dry-hot season but the lowest in rain season; the frequency of near-neutral condition was the highest in rain season but the lowest in foggy-cool season.

**Key words:** atmospheric stability; Monin-Obukhov length; ecoboundary layer; tropical seasonal rainforest