

热带季节雨林林冠碳通量不同校正方法的比较分析*

张一平^{1**} 窦军霞^{1,2,3} 孙晓敏⁴ 赵双菊^{1,3} 宋清海^{1,3} 于贵瑞⁴

(¹ 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; ² 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039; ⁴ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 利用西双版纳热带季节雨林 2003 年 3 月 1~ 9 日的 CO₂ 和水汽通量数据, 比较了不同校正方法的差异。结果表明, 对季节雨林林冠碳通量观测数据进行校正是必要的, 但不同校正方法所起的作用有所差异; 昼间 WPL 校正的作用最大, 虚温校正的作用最小; t 检验证明, 经 WPL 修正后的碳通量值与基准值、无显著差异; 聚类分析表明, 进行自然风 3 次旋转校正有利于数值精度的提高。夜间是自然风旋转校正的贡献最大、虚温校正贡献最小; t 检验表明, 经过 WPL 修正和平面旋转校正及其组合得到的碳通量值与基准值均有显著差异; 而经包含有自然风旋转校正处理后的碳通量值与基准值均无显著差异; 聚类分析表明, 经过自然风坐标旋转后, 再进行 WPL 修正, 有利于数值精度的提高。

关键词 碳通量 校正方法 热带季节雨林
文章编号 1001- 9332(2005) 12- 2253- 06 **中图分类号** S716 **文献标识码** A

A comparison of various correction methods for calculating carbon flux above tropical seasonal rainforest. ZHANG Yiping¹, DOU Junxia^{1,2,3}, SUN Xiaomin⁴, ZHAO Shuangju^{1,3}, SONG Qinghai^{1,3}, YU Guirui⁴ (¹Xishuangbanna Tropical Botanic Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; ²Research Centre for EcoEnvironmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; ³Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; ⁴Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China). Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16 (12): 2253~ 2258.

In this paper, various correction methods were compared, based on the observation data of the CO₂ and water fluxes above the canopy of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna during 1~ 9 March, 2003. The results showed that it was necessary to correct the observation data when calculating the carbon flux, though various correction methods contributed differently to the results. For daytime data, WPL made the most important contribution, while sonic temperature correction did the least. t test indicated that no significant difference was found between the carbon fluxes corrected by WPL and the standard values. Cluster analysis showed that triple rotation correction was helpful to improve the precision of the data. For nighttime data, it was the triple rotation correction that made the most important contribution, and sonic temperature correction also did the least. There existed significant differences between the carbon fluxes corrected by WPL, plane fit correction and their combination and the standard values, while the differences between the carbon fluxes corrected by double or triple rotation and the standard values were not significant. Cluster analysis showed that the data corrected orderly by coordinate axis rotated correction and WPL would be propitious to improve the precision. The results would provide a basis for calculating the fluxes within tropical rainforest in the future, and supply reference to the fluxes calculation for other areas.

Key words Carbon flux, Correction method, Tropical seasonal rainforest.

1 引言

陆地生态系统是人类赖以生存与持续发展的生命支持系统; 而森林作为陆地生态系统的主体, 在全球环境变化中起着举足轻重的作用。无论从面积、生物量还是碳储量上来看, 森林都是地球生物圈的重要组成部分, 是陆地生态系统的主体, 在整个陆地生态系统的结构和功能中居于重要的地位。研究森林及其与大气间 CO₂ 浓度、传输规律已是当今保护生态环境的一个重要内容。

随着科技的进步, 从 20 世纪 80 年代开始, 通过

直接测定风速、温度、湿度及气体浓度等要素的脉动值获得 CO₂、显热、潜热等气体和能量通量的涡度相关法, 成为通量观测中最为有效的直接测定方法, 开始得到较为广泛的应用^[4,11]。涡度法的应用, 使有关植物和大气之间气体交换的观测研究取得了划时代的进步。这种进步使得进行地表和大气之间的热量与物质通量的观测评价成为可能, 为更好地理解

* 国家基础研究发展规划项目 (2002CB412501) 和中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX 2SW2 01201A4)。
** 通讯联系人。Tel: 0872 5160904; E-mail: yipingzh@xtbg. ac. cn
2004- 12- 29 收稿, 2005- 05- 30 接受。

环境、生物及气候因子对植被和大气间物质与能量通量交换过程的影响做出了贡献^[5, 6, 8, 23, 29]. 但是涡度法在应用过程中对各方面条件的要求相当高, 观测样地的植被高度、林冠层的规则程度、下垫面面积的大小、地形的平坦程度、边界层的长度和稳定程度、仪器的安装高度、风速垂直成份的测量仪器与浓度测量仪器之间的距离、仪器的响应速度等因素都会对通量观测结果的准确性产生影响, 引发通量测定误差^[1~ 3, 7, 11~ 15, 17, 19, 20, 22, 24, 26~ 28].

由于绝大多数长期进行 CO₂、显热、潜热等气体和能量通量的实验更倾向于获得准确的植被层与大气间 CO₂ 的年交换量大小, 以利于进一步提高对于陆地碳循环过程的理解和认识, 而植被层与大气间 CO₂ 的净交换量又通常是庞大同化与分解量之间的较小差值, 因此对通量观测精确程度的要求较高. 随着近年通量工作在全世界范围内的迅速开展, 对通量观测值准确与否的担忧也随之而起. 对于森林生态系统来说, 全天感热和显热的通量值之和通常比可利用能量要小, 表现出能量不闭合. 对于非平坦地形来说, 能量不闭合的程度更加显著. 所以在利用涡度相关法进行通量研究时, 需要对观测得到的原始数据进行校正, 以达到分析要求^[10]. 一般而言, 通量观测的误差主要由两方面原因造成, 一是由于观测仪器自身条件的限制; 二是由于实际观测条件不能满足涡度相关法的一系列前提假设条件. Monceieff 等^[19]和 Massman 等^[18]已对因仪器原因造成的观测值误差及其校正方法进行了详细论述. 对第 2 种原因造成的通量观测值误差, 目前国际上常用的校正方法有虚温订正、趋势校正、坐标变换和 WPL 变换. 不同的观测地点需要采用的校正方法不同. 国际上许多研究者曾对复杂地形(如坡地)的通量数据, 采用自然风坐标旋转和平面拟合方法进行校正, 并且对涡度相关法中不同校正方法所产生的误差进行了分析研究^[16, 21, 25], 但是多集中在中、高纬的温带森林中, 对于热带森林的研究尚不充分. 东南亚北部以及我国西双版纳的地形较为复杂, 多为高低起伏的山地, 热带雨林主要分布在山间沟谷中, 因此在研究该区域的通量特征时, 需要对原始数据进行校正, 才能达到真实地反映自然状况之目的. 为此, 本文采用不同校正方法及其不同组合对西双版纳热带季节雨林中的涡度相关法观测得到的原始资料进行比较、分析, 以及差异显著性检验, 以确定西双版纳热带季节雨林涡度相关法碳通量计算的最佳校正方法, 为热带季节雨林通量的正确计算提供依据.

2 研究地区与研究方法

研究地区及研究样地的情况详见文献^[9].

涡度相关法指通过计算垂直风速和 CO₂ 浓度之间脉动的协方差得到 CO₂ 通量的方法. 样地中用于设置碳通量观测仪器的铁塔高 70 m, 用来测定瞬时三维风速、温度及其脉动值的三维超声风速测定仪(CSAT3, 美国 CAMPBELL 公司)安装在其 4818 m 处(高于林冠层 15~ 16 m). 通常将三维超声风速测定仪安装在铁塔的逆风向上, 以达到将铁塔导致的流场变形减小至最低程度的效果^[30]. 由于西双版纳处于西南季风区, 因此将仪器的探头固定于与正北的夹角为 210°的 3 m 长的铁臂支架上. 用来测量 CO₂ 和水汽通量的开路红外气体分析仪(L27500, 美国 L2COR 公司)同样安装在 4815 m 高度上. CSAT3 和 L27500 的取样频率均为 10 Hz.

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, 进而利用北京天正通公贸有限公司设计的通量处理软件对所得数据进行处理. 为比较不同校正方法的差异, 对 10 Hz 的原始数据采用了虚温湿度订正, 趋势校正和包括自然风系统 2 次旋转、自然风系统 3 次旋转和平面拟合在内的 3 种坐标旋转校正, 以及 WPL 变换, 校正时依据虚温 y 趋势 y 坐标变换 y WPL 校正的顺序, 通过这些校正方法的不同组合对数据进行处理; 另外还使用了由开路红外气体分析仪直接观测得到, 且未经过任何校正的原始数据进行对比分析.

本文选取 2003 年 3 月 1~ 9 日的观测数据进行分析. 该时段属于干热季, 温度相对较高, 湿度较低, 天气晴好. 分析中所用数据均为 30 min 的平均值, 以虚温+ 趋势+ 自然风系统 3 次旋转+ WPL 校正为基准进行比较. 考虑到昼间和夜间各种校正方法所受影响不同, 将原始数据分为昼间(8:00~ 19:00)和夜间(19:30~ 7:30)进行处理和比较.

3 结果与分析

311 不同时间林冠风速和风向变化

由图 1 可见, 研究期间的热带季节雨林林冠上风速在中午时分和前半夜较大, 而后半夜和上午较小, 在傍晚也有一个风速低值区. 风向具有较强的日变化特征, 昼间多为东北至东南风(45°~ 135°), 而夜间多为偏西风(250°~ 280°), 林冠上超声风速仪安装的方位角为 210°, 表明铁塔对测量的影响较小.

312 不同校正方法所得碳通量比较

31211 昼间 由图 2 可见, 昼间碳通量原始数据经不同坐标旋转校正和趋势校正后, 其通量绝对值越大, 与基准值的偏差也越大; 而经过 WPL 校正后的碳通量值与基准值有较好的一致性. 因此可以认为, 对西双版纳热带季节雨林林冠碳通量的昼间数据仅作坐标旋转校正和趋势校正是不够的.

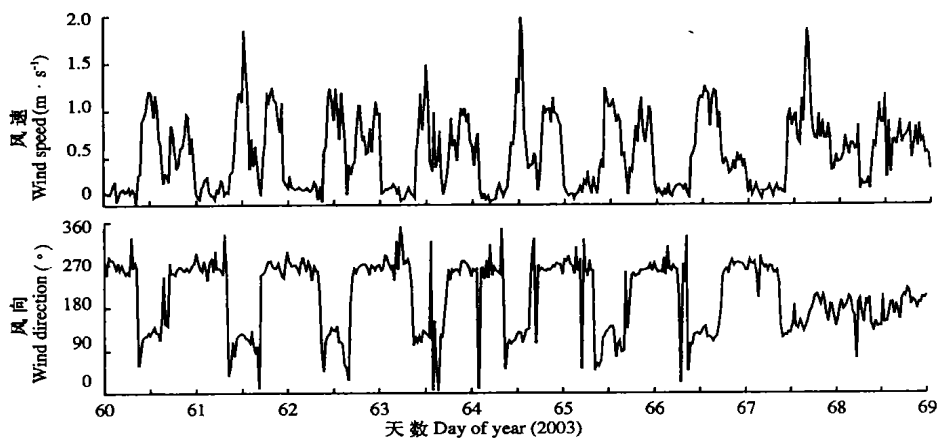


图1 林冠上风速、风向时间变化(超声测量)
Fig. 1 Variation of wind speed and wind direction(3D sonic anemometer) above the canopy.

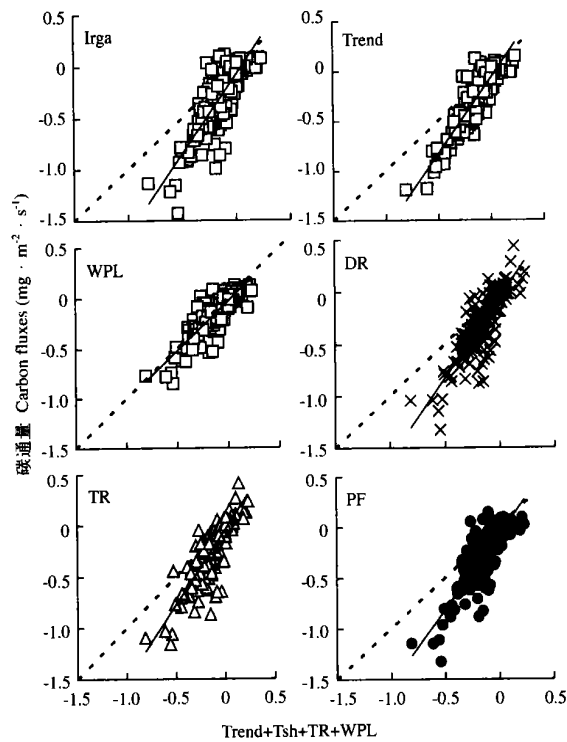


图2 昼间不同校正方法所得碳通量与基准值比较
Fig. 2 A comparison of carbon fluxes between corrected by various correction methods and by Trend+ Tsh+ TR+ WPL in the daytime.
Irga: 原始数据; Trend: 趋势 Trend correction; WPL: WPL 旋转 WPL correction; DR: 2 次旋转 Double rotation tilted correction; TR: 3 次旋转 Triple rotation tilted correction; PF: 平面旋转 Plane fit correction. 下同 The same below.

进一步求算经不同校正方法组合处理后的碳通量值, 通过与基准值的比较可知, 增加虚温校正后其规律与图 2 基本一致, 显示昼间虚温校正对西双版纳热带季节雨林林冠上碳通量的计算影响较小; 而经趋势校正后, 林冠上的碳通量数值趋于集中, 说明趋势校正对昼间西双版纳热带季节雨林林冠上碳通量数值的收敛有一定作用. 经趋势+ WPL 校正后,

林冠上的碳通量已十分接近基准值, 而再加上自然风系统 3 次坐标旋转校正后, 昼间林冠上的碳通量平均值达到基准值的 90%; 自然风系统 2 次坐标旋转和平面拟合校正分别与 WPL 的组合对数据的校正效果也较好(图 3).

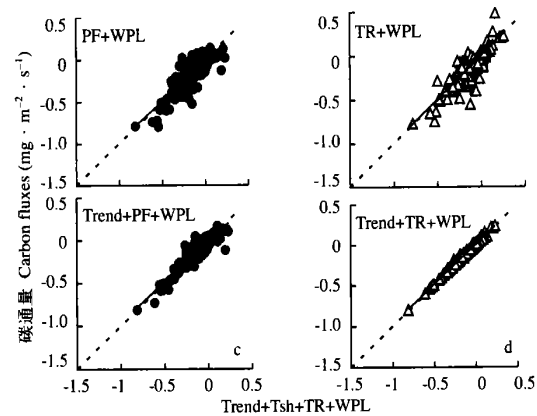


图3 昼间不同校正方法所得碳通量与基准值比较
Fig 3 A comparison of carbon fluxes between corrected by various correction methods and by Trend+ Tsh+ TR+ WPL in the daytime.

由图 4 可见, 第一级分类以是否进行 WPL 校正相区别; 其次为是否进行自然风 3 次坐标旋转校正来划分; 第 3 级中左支已无明显规律性, 而右支中未进行自然风坐标旋转校正的又以是否进行了趋势校正为分支, 而进行自然风坐标旋转校正的则以进行的是自然风 2 次坐标旋转校正还是自然风 3 次坐标旋转校正来区别. 因此可以认为, 在西双版纳热带季节雨林, 昼间林冠上的碳通量计算时最重要的是进行 WPL 校正, 其次是否进行自然风 3 次坐标旋转校正, 其他校正处于末级分类中, 可以认为作用不显著.
31212 夜间 由图 5 可见, 夜间原始数据和经过平面拟合校正后的碳通量数值越大, 与基准值的偏差

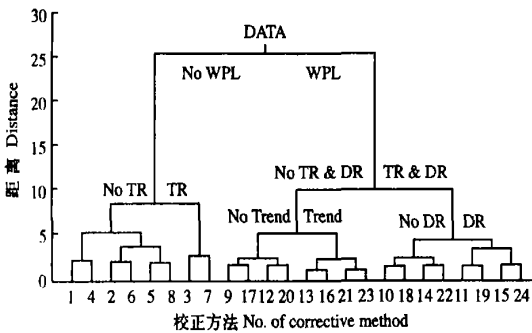


图 4 昼间林冠上不同方法校正后碳通量的聚类图
Fig.4 Cluster analysis of carbon fluxes corrected by various correction methods above the canopy in the daytime.

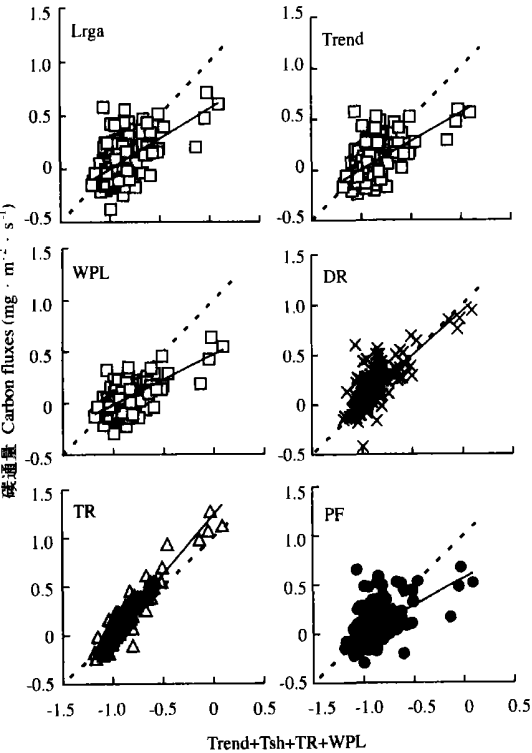


图 5 夜间不同坐标旋转校正所得碳通量与基准值比较
Fig. 5 A comparison of carbon fluxes between corrected by various correction methods and by Trend+ Tsh+ TR+ WPL in the nighttime.

越大;经趋势和 WPL 校正的碳通量值与基准值也有较大差异;而经过自然风 2 次和 3 次坐标旋转校正后的结果相对较好. 这表明对西双版纳热带季节雨林夜间林冠上的碳通量数据进行自然风坐标旋转校正有一定作用, 其他方法校正的效果则不显著.

进一步分析经各种校正方法组合处理后的碳通量值(图略)可知, 经过平面拟合+ WPL 校正的碳通量与基准值仍有较大差异, 而经过自然风 2 次和 3 次坐标旋转+ WPL 校正的碳通量值与基准值之间已有较好的一致性, 特别是自然风 3 次坐标旋转+ WPL 校正后的效果更好;与昼间相似, 虚温校正对碳通量

的计算影响较小;趋势+ 自然风坐标旋转的组合校正作用明显(图 6), 而趋势+ 平面拟合校正所得碳通量仍与基准值有较大差异;经趋势+ WPL 校正后, 林冠上的碳通量值仍与基准值之间有较大差异, 而通过趋势+ 自然风坐标旋转+ WPL 校正后的效果明显, 特别是经趋势+ 自然风 3 次坐标旋转+ WPL 校正后的碳通量夜间平均值是基准值的 103%(图 6).

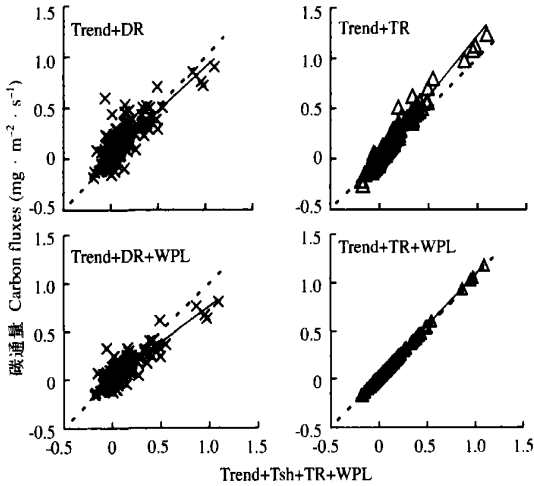


图 6 夜间不同坐标旋转校正所得碳通量与基准值比较
Fig 6 A comparison of carbon fluxes between corrected by various correction methods and by Trend+ Tsh+ TR+ WPL in the nighttime.
a)趋势+ 2 次旋转 Trend+ Double rotation tilted correction; b)趋势+ 3 次旋转 Trend+ Triple rotation tilted correction; c)趋势+ 2 次旋转+ WPL Trend+ Double rotation tilted+ WPL correction; d)趋势+ 3 次旋转+ WPL Trend+ Triple rotation tilted+ WPL correction.

由图 7 可见, 第一级分类以是否进行坐标旋转校正及采用何种坐标旋转校正为依据;随后左支以是否进行 WPL 校正来区分;近而左支继续以是否进行趋势校正来分类;右支则首先通过是自然风 2 次坐标旋转校正还是进行自然风 3 次坐标旋转校正来区分数据. 因此可以认为, 在西双版纳热带季节雨林, 夜间林冠上碳通量的计算中, 自然风坐标旋转校正和 WPL 校正的贡献较大.

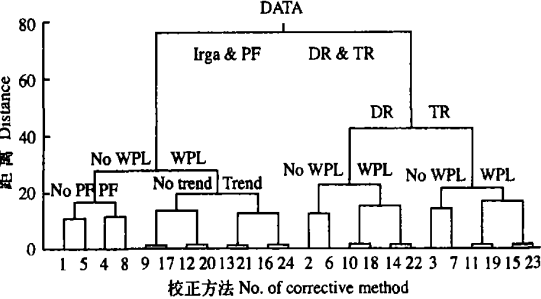


图 7 夜间林冠上不同方法校正后碳通量的聚类图
Fig 7 Cluster analysis of carbon fluxes corrected by various correction methods above the canopy in the nighttime.

313 不同校正方法所得碳通量与基准值的差异显著性检验

由表 1 可见,在昼间,除 1~ 8 号的校正方法外,其他校正方法均未达到显著水平. 比较发现,未达显著差异的校正方法中,均带有 WPL 校正,说明西双版纳热带季节雨林昼间林冠上碳通量的校正作用的贡献主要是 WPL 校正,其他校正方法的效果次之.

表 1 不同校正方法所得碳通量与基准值的差异显著性检验(t 检验)
Table 1 t test of carbon fluxes between the value corrected by various correction methods and by Trend+ Tsh+ TR+ WPL

校正方法 Correction methods	序号 No	昼 间 Daytime	夜 间 Nighttime
Irga	1	71 043422* * *	21634848
DR	2	61 176516* * *	- 2149668
TR	3	41 994524* * *	- 2157675
PF	4	61 221706* * *	11749925
Trend	5	61 39426* * *	21453014
Trend+ DR	6	51 647165* * *	- 1195161
Trend+ TR	7	41 435216* *	- 2126692
Trend+ PF	8	51 741209* * *	11606002
WPL	9	11 152136	41194024* *
DR+ WPL	10	01 396966	- 0113447
TR+ WPL	11	- 01 31992	- 0144288
PF+ WPL	12	01 70177	31673063*
Trend+ WPL	13	01 672691	41035023*
Trend+ DR+ WPL	14	01 104897	01307341
Trend+ TR+ WPL	15	- 01 60654	- 0115784
Trend+ PF+ WPL	16	01 384119	31530134
Tsh+ WPL	17	11 836845	41289219* *
Tsh+ DR+ WPL	18	11 053133	01046359
Tsh+ TR+ WPL	19	01 287832	- 012824
Tsh+ PF+ WPL	20	11 373292	31791992*
Trend+ Tsh+ WPL	21	11 347622	41130549* *
Trend+ Tsh+ DR+ WPL	22	01 748241	01476154
Trend+ Tsh+ PF+ WPL	23	- 11 04278	- 3164852*
Trend+ Tsh+ TR+ WPL	24	0	0

* P [01 05; * * P [01 01; * * * P [01 001.

夜间与昼间有较大差异. 比较发现,主要是 WPL 和平面拟合+ WPL 及与其相组合的其他校正方法处理的碳通量值与基准值之间差异显著;而与自然风 2 次和 3 次坐标旋转校正相组合的校正均与基准值无显著差异.

4 讨 论

综上分析可知,在西双版纳热带季节雨林林冠上,利用涡度相关法观测资料进行碳通量计算时,必须进行适当的校正,才能得到较为合理的数值;在昼间和夜间,不同校正方法的贡献不同;无论是昼间还是夜间,虚温校正都没有显著作用. 在昼间,经 t 检验表明,凡包含 WPL 的校正方法所处理的碳通量值,在与基准值间比较时,差异均不显著;反之,其差异均达显著水平;进一步参考聚类图可见,西双版纳

热带季节雨林昼间林冠上碳通量的校正作用的贡献主要是 WPL 校正,其次是自然风坐标旋转校正,其他校正方法的效果次之. 夜间与昼间有较大差异, t 检验结果发现,导致所计算的碳通量值与基准值差异显著的校正方法主要是 WPL 和平面拟合+ WPL 及与其相之组合的校正方法(未带有自然风 2 次或 3 次坐标旋转);而自然风 2 次和 3 次坐标旋转校正,以及与这两种方法相组合的校正所处理的碳通量值与基准值之间均无显著差异. 进一步参考聚类图可以认为,西双版纳热带季节雨林夜间林冠上的碳通量校正主要贡献是自然风坐标旋转校正;其次是 WPL 校正.

夜间如果采用不同的坐标旋转组合校正为基准,则可能得出不同的结果. 即如果以与平面拟合相组合的校正值为基准,所得结果将不同. 因此,夜间是采用自然风 3 次坐标旋转校正还是平面拟合校正,更能合理地反映真实的碳通量,将是值得深入研究的课题.

参考文献

1 Anderson DE, Verma SB, Rosenberg NJ. 1984. Eddy correlation measurements of CO₂, latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface. *BoundLay Meteorol*, 29: 167~ 183

2 Anthoni P, Law, BE, Unsworth MJ. 1999. Carbon and water vapor exchange of an open2canopied ponderosa pine ecosystem. *Agric For Meteorol*, 95: 151~ 168

3 Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. 2000. Estimates of annual net carbon and water exchange of European forests: The EU ROFLUX methodology. *Adv Ecol Res*, 30: 113~ 175

4 Baldocchi DD, Meyers TP. 1998. On using eco2physiological, m2 crometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and gaseous deposition fluxes over vegetation. *Agric For Meteorol*, 90: 1~ 26

5 Baldocchi DD, Kelliher F, Black TA, et al. 2000. Climate and veg2tation controls on boreal zone energy exchange. *Global Change Bi2ol*, 6(supp. 1): 69~ 83

6 Berbigier P, Bonnefond J, Mellmann P. 2001. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agric For Meteorol*, 108: 183~ 197

7 Businger JA. 1986. Evaluation of the accuracy with which dry d2e position can be measured with current micrometeorological tech2niques. *J Climate Appl Meteorol*, 25: 1100~ 1124

8 Constantin J, Grelle A, Ibrom A, et al. 1999. Flux partitioning b2etween understorey and overstorey in a boreal spruce/ pine forest d2etermined by the eddy covariance method. *Agric For Meteorol*, 98~ 99: 629~ 643

9 Dou 2X(窦军霞), Zhang Y2P(张一平), Ma Y2X(马友鑫), et al. 2003. A primary study on thermal effect of soil2 plant2 atmosphere continuum in tropical seasonal rain forest gap. *Environ Sci(环境科学)*, 23(6): 91~ 96(in Chinese)

10 Finnigan JJ, Clement R, Malhi Y, et al. 2003. A r2evaluation of long2term flux measurement techniques part N . Average and coo2dinate rotation. *BoundLay Meteorol*, 107: 1~ 48

11 Foken T, Wichura B. 1996. Tools for quality assessment of surface2based flux measurements. *Agric For Meteorol*, 78: 83~ 105

- 12 Goldstein AH, Hultman NE, Fracheboud JM, et al. 2000. Effects of climate variability on the carbon dioxide, water, and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA). *Agric For Meteorol*, 101: 113~ 129
- 13 Goulden ML, Munger JW, Fan SM, et al. 1996. Measurement of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol*, 2: 169~ 182
- 14 Goulden ML, Daube BC, Fan SM, et al. 1997. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *J Geophys Res*, 102 (D24): 28987~ 28996
- 15 Hollinger DY, Hollinger DY, Goltz SM, et al. 1999. Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapour exchange in an ecotonal boreal forest. *Global Change Biol*, 5: 891~ 902
- 16 Lee XH, Hu XZ. 2002. Forest fluxes of carbon, water and energy over non-flat terrain. *Bound-Lay Meteorol*, 103: 277~ 301
- 17 Mahrt L. 1998. Flux sampling errors for aircraft and towers. *J Atmos Ocean Technol*, 15: 416~ 429
- 18 Massman WJ, Lee X. 2002. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agric For Meteorol*, 113: 121~ 141
- 19 Moncrieff JB, Malhi Y, Leuning R. 1996. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of energy and water. *Global Change Biol*, 2: 231~ 240
- 20 Moore CJ. 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Bound-Lay Meteorol*, 37: 17~ 35
- 21 Paw UKT, Baldocchi DD, Meyers TP, et al. 2000. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Bound-Lay Meteorol*, 97: 487~ 511
- 22 Schmid HP, Grimmer CSB, Copley F, et al. 2000. Measurements of CO₂ and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States. *Agric For Meteorol*, 103: 357~ 374
- 23 Serca D, Guenther A, Klinger L, et al. 2001. EXPRESSO flux measurements at upland and lowland Congo tropical forest site. *Tellus*, 53B(3): 220~ 234
- 24 Turnipseed AA, Blanken PD, Anderson DE, et al. 2002. Energy budget above a high-elevation subalpine forest in complex topography. *Agric For Meteorol*, 110: 177~ 201
- 25 Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA. 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Bound-Lay Meteorol*, 99: 127~ 150
- 26 Wilson KB, Baldocchi DD. 2000. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broad-leaved temperate deciduous forest in North America. *Agric For Meteorol*, 100: 1~ 18
- 27 Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric For Meteorol*, 113: 223~ 243
- 28 Verma JK, Clement RJ. 1989. Carbon dioxide, water vapor and sensible heat fluxes over a tall grass prairie. *Bound-Lay Meteorol*, 46: 53~ 67
- 29 Vourlitis GL, Filho NP, Hayashi MM, et al. 2001. Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature Amazonian transitional tropical forest (cerrado). *Funct Ecol*, 15: 388~ 395

作者简介 张一平,男,1957年8月生,博士,研究员.主要从事生态气候学研究,发表论文100余篇. Tel: 087125160904; E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn
