

热带季节雨林林窗区域土壤-植物-大气连续体热力效应初步分析

窦军霞, 张一平*, 马友鑫, 刘玉洪, 郭萍(中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223, E-mail: djsx@xtbg.ac.cn yiping@public.km.yn.cn)

摘要: 利用西双版纳雾凉季和干热季热带季节雨林林窗的小气候观测资料, 探讨了昼间林窗地表温、气温及下层植物的叶温的时空分布和变化规律, 分析了叶温与气温和地表温的相互关系, 指出在林窗区域, 由于受雾和太阳高度的影响, 各小气候要素最大值随时间、季节的不同, 出现在林窗不同的方位, 并且存在叶温高值区时空动态位移现象; 另外, 林窗区域土壤-植物-大气连续体界面间热量传递方向随时间、季节的不同而发生着改变, 甚至在同一时段内, 林窗不同区域会存在热量传递方向截然相反的现象, 显示出林窗内可能存在热量循环的小环流。其结果对深入探讨林窗区域的热量传输, 小气候的形成机制、生物多样性和更新等问题均具有重要意义。

关键词: 林窗; 土壤-植物-大气连续体; 热力效应; 时空分布

中图分类号: S718 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2002)06-06-0091

A Primary Study on Thermal Effect of Soil-Plant-Atmosphere Continuum in Tropical Seasonal Rain Forest Gap

Dou Junxia, Zhang Yiping, Ma Youxin, Liu Yuhong, Guo Ping(Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, CAS, Kunming 650223, China)

Abstract: Made use of measurement data of microclimatic elements of canopy gap in tropical seasonal rain forest in fog-cool and dry-hot season in Xishuangbanna, the daytime characteristics of temporal-spatial distribution and variation of soil surface temperature, air temperature, and leaf temperature of understory plants in canopy gap were discussed. The finding showed that influenced by fog and solar altitude, the maximum value of microclimatic elements displayed at different site of gap in different time and season and there existed phenomenon about higher value area of leaf temperature dynamic displacement. In addition, the direction of heat transferring of soil-plant-atmosphere continuum varied with time and season, indeed at the same time, the different part of gap had the different heat transferring directions. The results would supply a research basis for further studying heat and water vapor transport, microclimatic formation, biodiversity and succession of canopy gap.

Key words: canopy gap; soil-plant-atmosphere continuum; thermal effect; temporal-spatial distribution

林窗是森林生长循环过程中必不可少的阶段之一^[1~4]。林窗的发生导致了光照的增加, 而引起林窗内地表面温度、近地层温度、湿度、土壤理化性质等一系列环境因子也发生相应的改变, 会直接影响繁殖体的传播、种子萌发、幼苗生存、树木生长、植物的构型和繁殖以及物种的多度和丰富度, 对于世界范围内的各种森林类型的更新和演替均有重要作用, 特别是在热带雨林中, 这种作用更为显著和重要^[5~11]。众多环境因子中, 温度是植物生长发育过程中最常遇到的制约因子之一。植物体中, 又以叶片对

温度的反应最敏感, 受环境中各生态因子的影响最大, 并且叶温与植物的光合、呼吸、蒸腾等生理生长活动有直接关系, 所以用叶温表示植物的温度状况较为客观^[12]。另外, 土壤-植物-大气连续体的热力效应关系到各界面间的水分、能量交换。

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-406); 云南省自然科学基金项目(98C098M); 国家自然科学基金项目(39770141)。

作者简介: 窦军霞(1976~), 女, 河北人, 博士研究生, 主要研究方向为生态气候学。

收稿日期: 2001-12-06; 修订日期: 2002-04-08

* 通讯联系人

本文根据西双版纳热带季节雨林林窗的小气候观测资料,通过对林窗区域下层植物的叶温时空变化特征及其与气温和地表温的关系进行的分析,初步探讨了林窗区域土壤-植被-大气连续体的热力效应,以为林窗更新、林窗小气候形成机制和林窗内生物多样性等问题提供科学依据。

1 样地概况和研究方法

1.1 样地概况

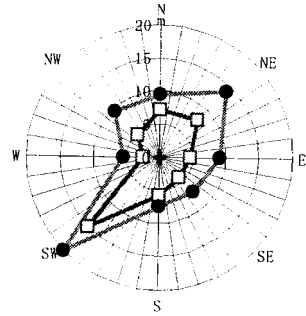
西双版纳一年中有干热季(3~4月)、湿热季(5~10月)和雾凉季(11~2月)之分^[13]。在雾凉季的晴天,雾浓且维持时间长,一般夜间22时后逐渐起雾,到次日中午12时左右才逐渐消散;干热季与雾凉季相比,雾生成时刻较迟,维持时间也较短,一般雾在夜间23时之后形成,而在次日上午10时左右就逐渐消散。

观测样地位于云南省西双版纳州勐腊县勐仑镇的热带季节雨林自然保护区内(21°57' N、101°12' E,海拔756 m)。雨林群落高度40 m左右,结构复杂,分层现象明显。乔木层按高度分为3层:上层高30 m以上,优势种主要为千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼(*Pometia tomentosa*);中层高度在16~30 m之间,常见种有云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)、山焦(*Mitrephora maingayi*)等;下层高16 m以下,主要种包括云树(*Garcinia cowa*)、假广子(*Kne ma erratica*)、细罗伞(*Ardisia tenera*)、蚊花(*Mezzettiopsis creaghii*)及毒鼠子(*Dichn petalum gelonioides*)等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木(*Sapros ma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)、玉叶金花(*Mussaenda* sp.)等。草本层与灌木层处于同一层次,种类不多,常见的有凤尾蕨(*Pteris* sp.)、海芋(*Aloxasis macrorrhiza*)、盈江南星(*Arisae ma inkiangensae*)等。藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,是典型的季节雨林^[14]。

1.2 研究方法

研究的林窗是1997年掘根倒木形成。该林

窗东北~西南向长约34 m,东南~西北向短约18 m,近似纺锤形。轮廓图的内圈线为实际林窗边缘(林窗边缘树冠垂线处),外圈线为扩展林窗边缘(林窗边缘树干处)。实际林窗的面积约116 m²,扩展林窗面积约449 m²(图1)。



—□—实际林窗边缘;—●—扩展林窗边缘

图1 热带季节雨林地林窗轮廓

Fig.1 The out-line of tropical seasonal rain forest canopy gap

在林窗中沿S~N、E~W设置2条观测样线,每条样线设置7个观测点,考虑到边缘效应的作用,观测点设为不等距分布,分别位于林窗中央、实际林窗边缘、扩展林窗边缘和林内。观测要素为地上1.5 m高处最高、最低气温和气温(最高、最低温度表,天津气象海洋仪器厂)、光照(数字式照度计,上海市嘉定学联仪表厂)、地面温度及林窗下层植物凤尾蕨的叶面温度(红外辐射温度计,COMPAC3,日本国 Minolta 株式会社)。观测在2000-12-24~12-26日(雾凉季)及2001-04-05~04-07(干热季)的昼间09:00~18:00进行,每小时观测1次。观测期间天气晴好。

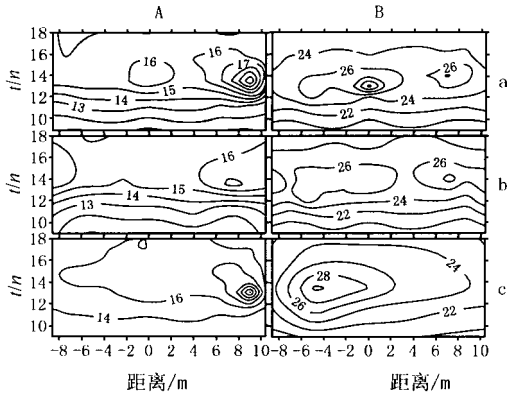
2 结果与分析

2.1 表面温度时空分布

2.1.1 南北向叶表温、气温及地表温时空分布

雾凉季南北向叶温、气温及地表温的时空分布如图2A所示。可见,上午11:00时前和下午16:00时后,因太阳辐射较弱,各测点的植物叶温、气温及地表温随时间变化较小,且值较低。11:00~16:00时之间,随着雾散日出,太阳辐射的增强,各方位植物叶温、气温及地表温值均有明显升高,特别是在北侧林窗边缘,其增温现象异常显著。各方位要素最大值多出现在13:00时或15:00时。由于雾凉季时太阳高度

较低,阳光斜射入林窗时,北侧林窗边缘接受到更多的太阳直接辐射,因而叶温、气温和地表温的最大值并未出现在林窗中央,而是出现在北侧实际或扩展林窗边缘,最大值分别为 25.5℃(13:00)、18.2℃(13:00)和 30.0℃(13:00)。



A. 雾凉季 B. 干热季 a. 叶温 b. 气温 c. 地表温

图 2 雾凉季和干热季林窗南北向叶温、气温及地表温时空分布

Fig. 2 Temporal-spatial distribution of leaf temperature, air temperature and soil surface temperature along south to north direction of gap in fog-cool and dry-hot season

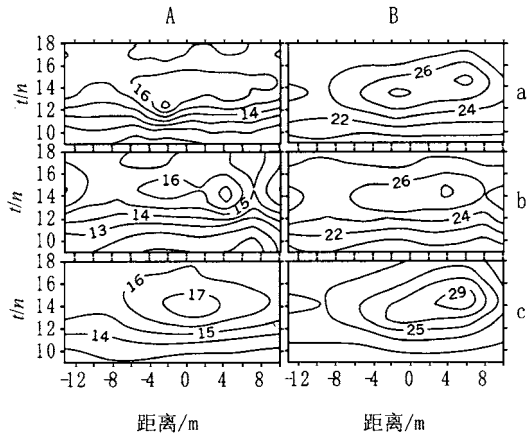
干热季各要素的时空变化规律与雾凉季不同(图 2B)。由于雾散日出时刻较早,太阳高度角较大,因而林窗内光照时间较长,各方位获得的辐射能量较多,使得昼间各要素值均比雾凉季高。各要素的最大值中心出现位置与雾凉季也有所差异,叶温、气温及地表温的最高值中心分别位于林窗中央、北侧实际林窗边缘和南侧实际林窗边缘,最大值分别为 32.8℃(13:00)、29.0℃(14:00)和 33.8℃(13:00)。

2.1.2 东西向叶温、气温及地表温时空分布

图 3A 显示了雾凉季东西向各温度的时空变化。11:00 前因浓雾影响,不同测点各温度值均升温缓慢。12:00 后,因植物叶表面、空气及地表面接受到更多的太阳辐射能量,各方位叶温、气温及地表温值升高较快,并先后出现最大值。西侧、东侧实际林窗边缘和林窗中央分别成为叶温、气温和地表温的最大值中心,最大值分别为 18.7℃(12:00)、18.0℃(13:00)和 18.1℃(13:00)。

干热季(图 3B)各方位叶温、气温和地表温

的时空变化规律与雾凉季相似,但昼间各要素值均比雾凉季时高。温度的最大值中心出现在林窗中央或东侧实际林窗边缘处。其中,林窗中央的叶温最大值为 32.8℃(13:00),比东侧实际林窗边缘的叶温最大值 32.0℃(15:00)略高,且出现时间更早,而气温和地表温的最大值都出现在东侧实际林窗边缘,分别为 29.4℃(14:00)和 34.5℃(14:00)。



A. 雾凉季 B. 干热季 a. 叶温 b. 气温 c. 地表温

图 3 雾凉季和干热季林窗东西向叶温、气温及地表温时空分布

Fig. 3 Temporal-spatial distribution of leaf temperature, air temperature and soil surface temperature along west to east direction of gap in fog-cool and dry-hot season

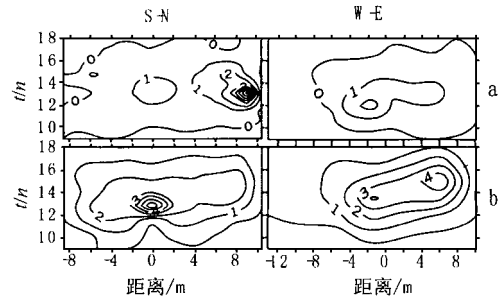
2.2 温差的时空变化特征

2.2.1 林窗各测点叶温与林内叶温差值的时空变化特征

雾凉季(图 4a)昼间的绝大多数时候,林窗各方位植物叶温高于林内,但相差不大。只是林窗中央、4 方位实际林窗边缘以及北侧扩展林窗边缘,在获得太阳能较多的个别时刻其叶温值高出林内较多。这一特点在北侧扩展林窗边缘表现最为显著,其最大差值在 13:00 可以达到 10.2℃,是雾凉季林窗各方位与林内的最大叶温差值。

干热季(图 4b)上午 11:00 前,林窗各测点叶温值普遍低于林内,但差值较小,负最大差值绝对值为 1.0℃(东侧扩展林窗边缘,11:00)。12:00 后,随着林窗内太阳直接辐射的增强,林窗各测点植物叶温开始逐渐高于林内。12:00 ~

16:00 之间,林窗各方位植物叶表温与林内差异明显,其中林窗中央、东侧实际和扩展林窗边缘成为差值高值中心,最大差值分别为 8.5°C (13:00)、 8.7°C (15:00) 和 8.0°C (15:00)。



a. 雾凉季 b. 干热季 S-N 从南到北 W-E 从西到东

图 4 雾凉季和干热季林窗叶温与林内差值时空分布
Fig. 4 Temporal-spatial distribution of leaf temperature difference between gap and interior of forest in fog-cool and dry-hot season

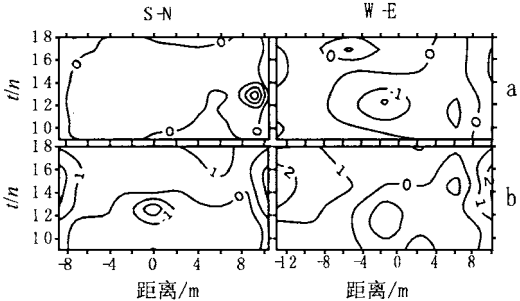
2.2.2 气叶温差的时空变化特征

雾凉季(图 5a)林窗各测点气温值在昼间的大部分时候低于叶温,但除北侧扩展林窗边缘和西侧实际林窗边缘的气温与植物叶温差异较大,负最大气叶温差值分别达到 -10.3°C (13:00) 和 -4.8°C (12:00) 外,其它方位都在 -2.0°C 以内。林窗各方位中只有东侧和西侧实际林窗边缘在 15:00 气温高于叶温较多,最大气叶温差值分别为 1.2°C 和 1.0°C 。林内的气叶温差变化规律与林窗刚好相反,其昼间气温值总高于叶表温,气叶温差最大值为 1.3°C (16:00)。与雾凉季相比,干热季林窗各方位气温高于叶温的时间增加,且差值略大(图 5b)。最大气叶温差值分别在 15:00 和 16:00 出现在林窗中央和东侧实际林窗边缘,均为 1.6°C 。但各方位在气温低于叶温的时刻,负差值依然较大,在林窗中央和东侧扩展林窗边缘,负最大差值仍分别达到了 -5.0°C (13:00) 和 -5.1°C (15:00)。林内的气叶温差时空变化特征与雾凉季相似,昼间气温值总高于叶温,但差值比雾凉季时大,最大差值为 2.6°C (11:00)。

2.2.3 地叶温差时空变化特征

与气叶温差的时空变化特征相反,雾凉季时(图 6a)各方位地表温值在昼间绝大多数时候

高于叶温,并且除北侧扩展林窗边缘外,其它方位的地叶温差时空变化都呈现高~低~高分布趋势,温差最大值在 $1.3^{\circ}\text{C} \sim 2.3^{\circ}\text{C}$ 之间,均出现在 9:00 或 10:00。北侧扩展林窗边缘的地叶温差值则呈现低~高~低的变化趋势,13:00 前差值随时间逐步升高,最大地叶温差值达到 4.5°C 。东、南、西侧实际林窗边缘的地表温值在个别时刻小于叶温,差值分别是 -1.4°C (13:00)、 -1.1°C (15:00) 及 -2.6°C (12:00)。



a. 雾凉季 b. 干热季 S-N 从南到北 W-E 从西到东

图 5 雾凉季和干热季林窗区域气温与叶温差值时空分布
Fig. 5 Temporal-spatial distribution of air temperature and leaf temperature difference of gap in fog-cool and dry-hot season

从图 6b 可见,干热季不同测点的地叶温差的时空变化特征大致可分为 2 种情况:在东侧、南侧实际和扩展林窗边缘以及林窗中央,地表温值高于叶温的时间较长,且差值较大,最大地叶温差值为 7.3°C (南侧实际林窗边缘,13:00)。在北侧、西侧实际和扩展林窗边缘及林内,除部分时候地表温值略高或接近叶温外,地表温值总低于叶温,最大的叶温差负值出现在北侧扩展林窗边缘,为 -2.7°C (14:00)。

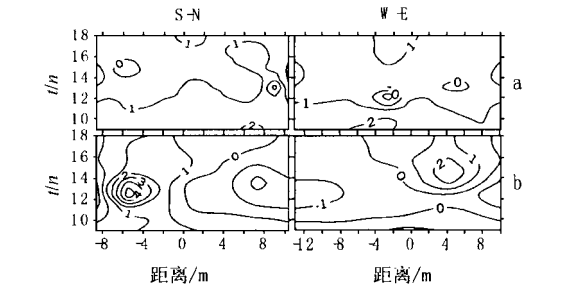
2.3 平均叶温、气叶温差和地叶温差的空间分布

各温度和温差均有较显著的时间变化,为此统计了各温度的上午(9:00~11:00)、中午(12:00~15:00)和下午(16:00~18:00)的平均值,对各要素值进行了空间分析。

2.3.1 平均叶温值的空间分布

图 7 说明,雾凉季上午叶温值较低,并且不同方位之间叶温值相差很小;中午受太阳直接辐射的影响,各测点叶温值迅速升高,叶温的水平空间差异(叶温水平梯度)也相应增大,高值中心位于北侧扩展林窗边缘处;下午,随着太阳

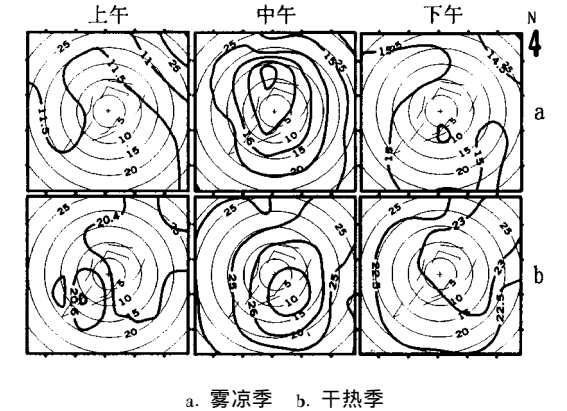
辐射的减弱,各方位叶温值降低,并且叶温水平空间梯度也随之减小,但北侧扩展林窗边缘处叶温值仍比其它方位略高。



a. 雾凉季 b. 干热季 S-N从南到北 W-E从西到东
图 6 雾凉季和干热季林窗区域地表温与叶温差值时空分布

Fig. 6 Temporal-spatial distribution of soil surface temperature and leaf temperature difference of gap in fog-cool and dry-hot season

干热季不同时间段的叶温值均较雾凉季高。上午叶温的水平空间梯度较小,高值区域出现在西南侧实际林窗边缘;中午,高值区域中心位于林窗中央偏东南处,并且实际林窗内显著的增温率使得林窗区域的叶温空间水平梯度增大;下午的叶温水平空间差异较小,林窗东侧和北侧边缘叶温值比其它方位稍高。



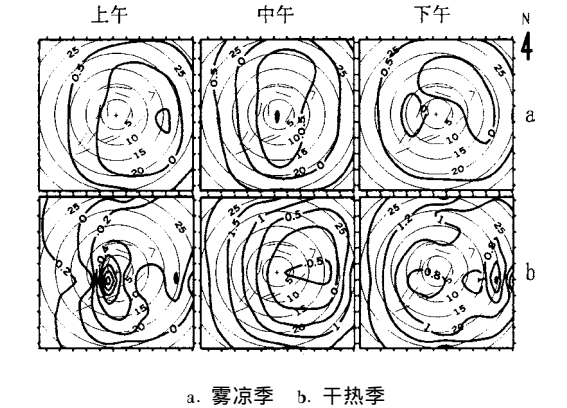
a. 雾凉季 b. 干热季
图 7 雾凉季和干热季林窗区域叶温的空间分布
Fig. 7 Spatial variation of leaf temperature of gap in fog-cool and dry-hot season

2.3.2 平均气叶温差的空间分布

雾凉季上午,除西侧扩展林窗边缘和林内的气温值高于叶温(温差为正)之外,其它方位的气叶温差均为负值,负差值中心出现在东侧扩展林窗边缘。中午,林窗区域气温值仍普遍低于叶温,并且气叶温差异进一步增大,负差值中

心转移到北侧扩展林窗边缘。而下午,各方位气叶温差值有所减小,且林窗内部分方位的气温值已略高于叶温(图 8a)。

干热季上午依然是除西侧扩展林窗边缘和林内气叶温差为正之外,其它方位气温都低于叶温(气叶温差为负),负高值中心出现在西侧实际林窗边缘。中午,林窗区域部分测点的气温值已高于叶温,最大差值出现在林内。下午,各方位气温值均高于叶温,除林内的气叶温差异仍较大外,东侧和北侧实际林窗边缘也成为差值的高值区中心(图 8b)。



a. 雾凉季 b. 干热季
图 8 雾凉季和干热季林窗区域气叶温差空间分布
Fig. 8 Spatial variation of difference between air temperature and leaf temperature of gap in fog-cool and dry-hot season

2.3.3 平均地叶温差的空间分布

雾凉季全天各方位的地表温值都高于叶温。上午,除北侧扩展林窗边缘外,各测点的地表温差值均为全天最大,并且西侧实际林窗边缘是差值的高值区中心。中午,差值高值区中心转移到北侧扩展林窗边缘。下午,差值高值区中心又重新回到西侧实际林窗边缘(图 9a)。

干热季上午林窗区域的地表温差异不明显,且差值的水平空间梯度较小,林窗中央差值比其它方位略高;中午,差值的水平空间差异显著,且在林窗区域明显地分为 2 部分,其一,在西侧、北侧林窗边缘和林内,地表温差为负值,且地表温低于叶温较多,负值中心位于北侧扩展林窗边缘;其二,在东侧、南侧林窗边缘和林窗中央的地表温高于叶温,南侧扩展林窗边缘成为差值的高值中心;因而在林窗区域形成了相反的温差分

布.下午,林窗区域地表温普遍高于叶温,差值的水平空间梯度大小介于上午和中午之间,东侧实际林窗边缘成为差值的高值中心(图 9a)。

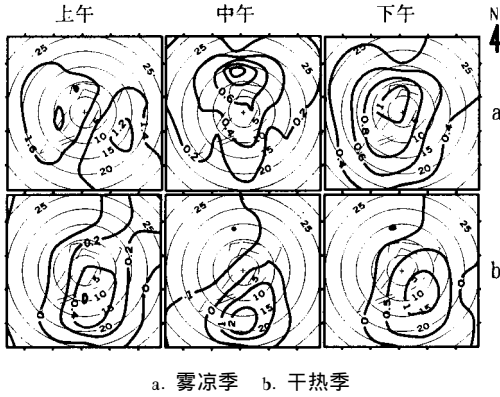


图 9 雾凉季和干热季林窗区域地叶温差的水平空间分布
Fig. 9 Spatial variation of difference between soil surface temperature and leaf temperature of gap and forest in fog-cool and dry-hot season

2.4 小结与讨论

(1) 受地方气候现象(雾)和太阳高度的影响,昼间叶温、气温和地表温值的最大区域,在雾凉季一般出现在北侧实际或扩展林窗边缘,而干热季则位于林窗中央、东侧实际林窗边缘处。这一现象与我们对同一地区热带次生林林窗小气候要素的观测结果基本吻合。

(2) 从气叶温差和地叶温差的时空分布情况,可得到叶温、气温和地表温在不同时段的大小顺序,进而了解到林窗区域不同季节和不同时段的热量流动的方向。在雾凉季的上午和中午,林窗内的总趋势为地表温 > 叶温 > 气温,其特征在北侧扩展林窗边缘表现最显著,显示热量从地表面、下层植物冠面传向空气;下午时,林窗内一些测点的热量传递方向保持不变,但另外一些方位温度大小顺序则变为地表温 > 气温 > 叶温,表明某些方位热量从地表面向空气和下层植物冠面传送的同时,空气也在向下层植物冠面传热。林内地表面和空气在昼间总是向下层植物冠面放热,但上午和中午时,地表温高于气温,为地表温 > 气温 > 叶温,而下午气温高于地表温,为气温 > 地表温 > 叶温。

(3) 干热季上午林窗内总趋势是地表温 > 气温 > 叶温,下层植物冠面同时受地表面和空

气两处的热力影响;中午时,林窗的西侧、北侧边缘处,分布趋势为气温 > 叶温 > 地表温,热量从空气传向下层植物冠面、地表面;而在林窗东侧、南侧边缘和林窗中央,则为地表温 > 叶温 > 气温,热量从地表面传向下层植物冠面、空气;下午时,林窗内又统一为气温 > 地表温 > 叶温。干热季林内昼间温度值大小顺序始终是气温 > 叶温 > 地表温,热量总是由空气向植物下层冠面和地表面传递。

(4) 以上分析的结果表明,在林窗的土壤-植物-大气连续体内,热量传递方向随时间、季节的不同而改变,甚至在同一时段内,林窗不同区域会存在热量传递方向截然相反的现象。这显示林窗区域内可能存在热量循环的小环流现象,由于此次观测条件所限,无法得出更为详细的结论,更深入的研究将是今后的课题之一。

致谢 本研究得到中国生态系统研究网络西双版纳热带森林生态站的大力支持,在观测中使用了部分该站的观测仪器,该站的段文平、刘梦楠、鲁云等同志参加了观测,在此表示感谢!

参考文献:

- 1 Watt A S. Pattern and process in the plant community[J]. Journal of Ecology, 1947, 35: 1 ~ 22.
- 2 Whitmore T C. Gaps in the forest canopy. In: Tomlinson P B, Zimmermann M H (eds.), Tropical Trees as Living Systems. Cambridge: Cambridge University Press, 1978. 639 ~ 655.
- 3 Whitmore T C. Canopy gaps and the two major groups of forest trees[J]. Ecology, 1989, 70(3): 536 ~ 538.
- 4 Whitmore T C. An Introduction to Tropical Rain Forest. Oxford[J]. Clarendon Press, 1990. 23 ~ 28, 99 ~ 132.
- 5 Brokaw N V L, Scheiner S M. Species composition in gaps and structure of a tropical forest[J]. Ecology, 1989, 70(3): 538 ~ 541.
- 6 Brown N. The implications of climates and gap microclimate for seedling growth condition in a Bronean lowland rain forest[J]. Journal of Tropical Ecology, 1993, 9: 153 ~ 168.
- 7 Connell J H. Some processes affecting the species composition in forest gaps[J]. Ecology, 1989, 70(3): 560 ~ 562.
- 8 Canham C D, Denslow J S, Platt W J, Runkle J R, Spies T A, White P S. Light regimes beneath closed canopies and tree fall gaps in temperate and tropical forest[J]. Canada Journal of Forest Resource, 1990, 20: 620 ~ 631.
- 9 Denslow J S. Gap partitioning among tropical rainforest trees[J]. Biotropica, 1980, 12: 47 ~ 55.
- 10 Runkle J R. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America[J]. Ecology, 1982, 62(4): 1041 ~ 1051.
- 11 Schupp E W et al. Arrival and survival in tropical treefall gaps[J]. Ecology, 1989, 70(3): 562 ~ 564.
- 12 曲仲湘, 吴玉树, 王焕校, 姜汉桥, 唐延贵. 植物生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. 42 ~ 68.
- 13 张克映. 滇南气候的特征及形成因子的初步分析[J]. 气象学报, 1966, 33(2): 210 ~ 230.
- 14 任泳红, 曹敏, 唐建维, 唐勇, 张建侯. 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.