

# 热带季节雨林林窗边缘不同热力作用面热力效应的季节变化特征

窦军霞<sup>1</sup> 张一平<sup>1</sup> 马友鑫<sup>1</sup> 刘玉洪<sup>1</sup> 郭萍<sup>1</sup> 王进欣<sup>2</sup>

1(中国科学院西双版纳热带植物园昆明分部, 昆明 650223)

2(徐州师范大学城市环境科学系, 徐州 211029)

**摘要:**通过对热带季节雨林雾凉季和湿热季昼间林窗区域不同热力作用面的热力效应初步分析,指出在西双版纳,不论是雾凉季还是湿热季,热带季节雨林林窗边缘壁面均具有不可忽视的热力作用,且由于受林缘树木的影响,热力效应较强的东侧、北侧林缘壁面最大区域出现位置高于次生林林窗,而强度小于次生林林窗。显示了林窗边缘壁面的热力效应除与太阳高度角、太阳辐射的时间长短和强度有关之外,林窗边缘树木高度也是不可忽视的因子。其结果可为进一步研究林窗小气候形成机制提供研究基础,为研究林窗更新及生物多样性问题提供科学参考。

**关键词:**热带季节雨林,林窗,林窗边缘林墙壁面,热力作用面,西双版纳

中图分类号:Q948.5718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-0094(2001)04-0366-07

## Characteristics of thermal effects and seasonal variation on different thermal active surfaces of canopy gaps in tropical seasonal rain forest

DOU Jun-Xia<sup>1</sup>, ZHANG Yi-Ping<sup>1</sup>, MA You-Xin<sup>1</sup>, LIU Yu-Hong<sup>1</sup>, GUO Ping<sup>1</sup>, WANG Jin-Xin<sup>2</sup>

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223

2 Department of Urban and Environmental Science, Xuzhou Normal University, Xuzhou, Jiangsu 211029

**Abstract:** Based on the analyses of daytime thermal effects of different thermal active surfaces in canopy gaps in tropical seasonal rain forest in the cool-fog and hot-wet season in Xishuangbanna, the thermal characteristics of different thermal active surfaces in canopy gaps are described. The finding showed that: The thermal effect of vertical thermal active surfaces is not negligent, not only in the cool-fog season, but also in the hot-wet season. Moreover, influenced by the height of trees that form the edge of the gap, the height of maximum area of thermal effect of vertical thermal active surfaces at the east and north edge of gaps in tropical seasonal rain forest was higher than that in secondary forest, but the intensity of thermal effects was weaker, compared to secondary forest. This indicates that, besides solar angle, time and intensity of radiation, the height of trees is also an important factor that influences thermal effects of vertical thermal active surface of edges. The results supply a research basis for understanding microclimatic formation of canopy gaps, for studying forest succession and effects of forest biodiversity.

**Key words:** tropical seasonal rain forest, canopy gap, vertical thermal active surface of edges, thermal active surface, Xishuangbanna

## 1 引言

林窗是森林生长循环过程中必不可少的阶段之一(Watt, 1947; Whitmore, 1978, 1989, 1990)。因为

林窗的出现,造成了森林内的温度变化程度(日较差和年较差)比林外小以及林内夜暖昼凉和冬暖夏凉的热力特征发生改变(王正非等, 1985; 翁笃鸣

等,1981),而这些变化将引起土壤理化性质、营养元素的分解、土壤微生物的活性等环境因子发生相应的变化(Brown,1993),从而导致林窗环境的异质性。林窗微环境在森林种群动态方面扮演着重要角色(Bazzaz & Wayne,1994;Brokaw,1985;Canham et al.,1990;Clark,1990;Denslow,1980),它对繁殖体的传播、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都起着重要作用(Connell,1989;Brokaw & Scheiner,1989;Schupp et al.,1989;Runkle,1982)。在林窗环境异质性中,对于林窗的小气候环境方面已有了一些报道(Brown,1993;臧润国等,1999;张一平等,1999;王进欣等,1999),但这些研究都局限于对光、温、湿等环境因子在水平方向的时空变化上,忽略了林窗作为一个立体空间,其垂直方向上也存在环境异质性问题。张一平、王进欣等(2000,2001)曾对西双版纳热带次生林林窗的边缘壁面热力效应进行过初步研究,指出林窗边缘的热力效应不可忽视,其热力作用在昼间某些时候甚至大于林窗中央地表面。鉴于热带季节雨林的重要地位和作用,对其林窗不同热力作用面,特别是林窗边缘壁面的热力特征的研究就显得十分重要,这将有助于解决林窗边缘壁面的热力效应是否普遍存在、受哪些因素影响、是否存在热力特征时空变化的普遍规律等一系列问题,并能为林窗更新、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。

## 2 研究地概况与研究方法

### 2.1 研究地概况

西双版纳位于云南省南部,终年受西南季风控制,属热带季风气候,一年中有雾凉季(11月~次年2月)、干热季(3月~4月)和湿热季(5月~10月)之分(张克映,1966)。在雾凉季晴天较多,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时后才逐渐消散。湿热季本地区仍有雾出现,但是相对雾凉季来说,其浓度较弱,起雾较迟(0时前后),消散较早(10时前后);并且阵性降水日较多,几乎每天下午15时前后均出现降水。

本次观测的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)。雨林群落高度一般为30~40 m,结构复杂,分层现象明显。乔木层即可分为三

层:上层优势种主要为干果榄仁(*Terminalia myriocarpa*)、番龙眼(*Pometia tomentosa*),中下层类型主要是云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、细罗伞(*Ardisia tenera*)、窄序岩豆藤(*Millettia leptobotrya*)等(任泳红等,1999)。

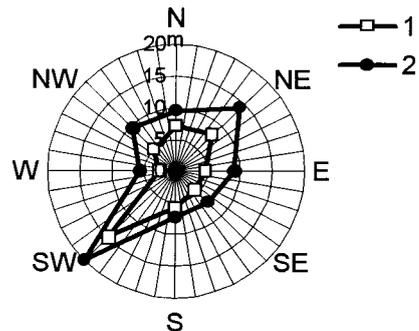


图1 热带季节雨林林窗轮廓

1. 实际林窗边缘;2. 扩展林窗边缘

Fig.1 The outline of tropical seasonal rain forest canopy gap

1. The edge of gap;2. The edge of extended gap

### 2.2 研究方法

本文所选择的林窗是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 m<sup>2</sup>,扩展林窗面积约449 m<sup>2</sup>。林窗边缘树木(观测样木)的高度为:东侧22 m,北侧26 m,西侧32 m,南侧32 m。

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),光照(数字式照度计)以及地表面温度。在林窗边缘的东(E)、南(S)、西(W)、北(N)侧(以林窗中央为基准,下同)和林内观测了树干不同高度(0 m、0.5 m、1 m、2 m、4 m、8 m、12 m、16 m、20 m、林冠下)的表面温度(红外辐射温度计,COMPAC3,日本国Minnolta株式会社)。观测在1998年12月19~20日的9~17时及1999年7月25日和10月14~15日的8~18时进行,每小时整点观测一次。

本文乃是利用各观测点的地表面温度以及4方位林窗边缘和林内不同高度树干表面温度昼间观测值,对林窗区域不同热力作用面的热力特征进行分

析所得的初步结果。

### 3 结果与分析

由于西双版纳地区雾凉季和湿热季的气候状况有较大差异,所以将观测资料分为雾凉季(1998年12月)和湿热季(1999年7月和10月平均)进行分析。

#### 3.1 树干表面温度的时空分布

3.1.1 林窗边缘树干表面温度的时空分布 热带季节雨林4方位林窗边缘树干表面温度时空分布如图2所示。可见在雾凉季,由于受浓雾的影响,上午12时前4方位林窗边缘树干表面温度随着树干高度增加变化不明显,并且随时间的推移,增温幅度也不大。各方位间的差异也不大。上午12时后,雾散日出,随着太阳辐射的增强,不同方位林窗边缘树干表面温度的垂直分布表现出明显差异。受太阳直接

照射的东侧边缘,在树干8 m及20 m附近出现表面温度高值区,树干8 m处的温度最大值为18.8℃(15时)20 m处为19.8℃(15时)。太阳直接照射的北侧边缘,以树干12 m处为中心,形成表面温度高值区,温度最高值为18.9℃(14时)。林窗南侧和西侧边缘基本上没有太阳的直接照射,树表温低于受太阳直接辐射的林冠,并且树冠所获得的热量向下传递,因而在林窗南侧和西侧边缘形成逆温分布,最大值出现在林窗边缘壁面上层。

湿热季4方位树表温时空分布规律与雾凉季相似(图3),上午12时前4方位树表温随高度变化较小。上午12时后,受太阳直接照射的东侧、北侧林窗边缘树干表面形成温度高值区。其中,东侧边缘的表面温度高值区出现在树干8~12 m处和20 m附近,温度最高值分别可达28.0℃(15时)和27.5℃(15时);北侧边缘则以树干8 m和20 m处

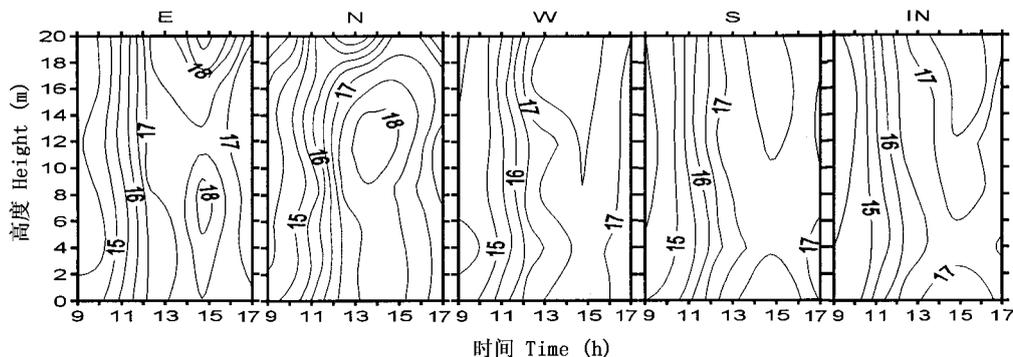


图2 雾凉季林窗边缘及林内树表温时间变化

E: 东侧; N: 北侧; W: 西侧; S: 南侧; IN: 林内

Fig. 2 Temporal variation of trunk surface temperature at the edge of gaps and in the interior of the forest in the cool-fog season

E: East edge; N: North edge; W: West edge; S: South edge; IN: Interior of forest

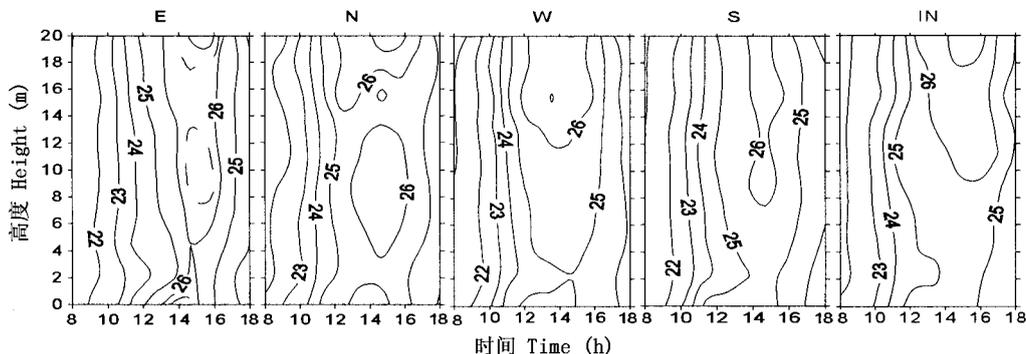


图3 湿热季林窗边缘及林内树表温时间变化

E: 东侧; N: 北侧; W: 西侧; S: 南侧; IN: 林内

Fig. 3 Temporal variation of trunk surface temperature at the edge of gaps and in the interior of the forest in the hot-wet season

E: East edge; N: North edge; W: West edge; S: South edge; IN: Interior of forest

为中心形成表面温度高值区,温度最高值分别为 $27.2^{\circ}\text{C}$ (16时)和 $28.6^{\circ}\text{C}$ (15时)。另外由于湿热季太阳高度较高,太阳光能够直接照射到树干下部,同时也因为受林窗边缘地表温的影响,在东侧和北侧树干基部附近(0 m)也形成了表面温度高值区。林窗南侧和西侧边缘树表温仍是上高下低分布型,最大值都出现在树干上部,分别为 $27.2^{\circ}\text{C}$ (15时)和 $27.5^{\circ}\text{C}$ (12时)。

**3.1.2 林内树表温的时空分布** 雾凉季和湿热季的林内树表温的时空变化(图2~3)与已有研究报道的规律相同(张一平等,2000,2001):上午树表温的垂直变化不明显,下午,受太阳直接辐射的树冠层温度最高,热量下传,形成树表温的逆温分布。其温度最大值雾凉季为 $17.9^{\circ}\text{C}$ ,湿热季为 $28.5^{\circ}\text{C}$ ,均于15时出现在树干20 m处。

### 3.2 林窗边缘与林内树表温差异特征

在雾凉季,4方位林窗边缘各高度树干表面温度普遍高于林内,特别是上午12时后,东侧和北侧(图4)林窗边缘表现尤为突出,形成了树表温差值的高值区:林窗边缘东侧差值的高值区有两处,分别出现在树干20 m和8 m处,20 m处最大差值为 $1.9^{\circ}\text{C}$ (15时),略高于8 m处的差值最大值 $1.5^{\circ}\text{C}$ (15时);林窗边缘北侧2~14 m均可看作高值区,在8 m处出现最大差值 $2.0^{\circ}\text{C}$ (13时)。西侧和南侧(图略)各高度树表温与林内的差值不大。

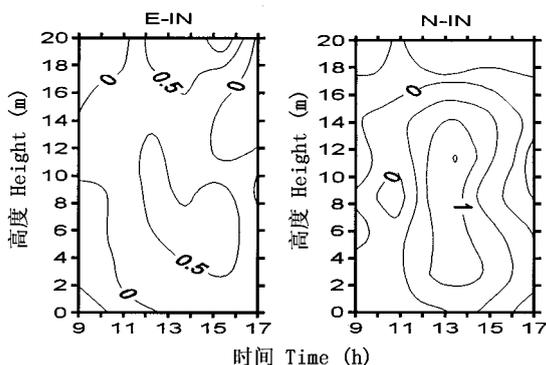


图4 雾凉季林窗东侧、北侧边缘与林内树表温差的时空分布

E-IN: 东侧-林内; N-IN: 北侧-林内

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of differences of trunk surface temperature between east and north edges of gap and interior of forest

E-IN: East edge minus interior; N-IN: North edge minus interior

而在湿热季(图略),4方位林窗边缘各高度树干表面温度,只是在太阳高度角较大、太阳辐射较强

的12~15时,在部分高度树干上高于林内树干表面温度,并形成差值高值区。差值高值区现象仍是在东侧和北侧边缘表现明显。东侧的差值高值区出现在树干8 m附近,差值最大值为 $1.7^{\circ}\text{C}$ (15时);北侧的差值高值区有两处:树干4 m附近和树干上部,4 m附近的差值高值区最大差值为 $1.3^{\circ}\text{C}$ (14时),低于树干上部的差值最大值 $1.7^{\circ}\text{C}$ (12时,16 m)。西侧和南侧的差值高值区现象表现不太明显。

季节雨林林窗东侧和北侧边缘树表温与林内树表温的差值在一定高度出现高值区的现象,与张一平等(2000,2001)在同一地区对树高约为18 m的次生林林窗研究所得结果一致。但由于季节雨林林窗边缘的树木较高,一日当中,只有太阳高度角较大时,太阳光才能直接照射到林窗内,使得季节雨林林窗边缘树表温差值高值区所在位置的高度高于次生林林窗。同时,高大树木对太阳辐射的遮挡作用,又造成季节雨林林窗边缘树表温差值高值区的热力效应强度小于次生林林窗。这说明林窗边缘壁面的热力效应除与太阳高度角、太阳辐射的时间长短和强度有关外,林窗边缘树木高度也是不可忽视的因子。

### 3.3 不同热力作用面的表温差差异

为定量比较季节雨林林窗区域不同热力作用面热力效应的差异,取林内地表面温度的平均值为基准,求算其他热力作用面表面温度与其的差值,对不同热力作用面的热力特征进行分析。

**3.3.1 林窗边缘林墙壁面** 雾凉季上午12时前,4方位林窗边缘各高度树表温均低于林内地表温(图5),其绝对差的最大值都出现在林缘壁面的下部,表明上午林内地表面的热力效应大于林缘壁面。12时后,随着太阳辐射的增强,差值逐渐由负转正。到下午13时,除西侧边缘部分高度树表温略低于林内地表温之外,其他方位林窗边缘各高度树表温都已经超过林内地表温。13时后,4方位林窗边缘各高度树表温与林内地表温之间的差异进一步增大,并先后在不同高度形成差值高值区。东侧的差值高值区出现在树干8 m和20 m处,8 m处的差值最大值为 $1.5^{\circ}\text{C}$ (15时),20 m处的差值最大值为 $2.5^{\circ}\text{C}$ (15时)。北侧在树干12 m处形成差值高值区,最大差值为 $2.2^{\circ}\text{C}$ (13时)。西侧和南侧在树干上部形成差值高值区,但差值最大值小于东侧和北侧,西侧差值最大值为 $1.2^{\circ}\text{C}$ (13时,20 m),南侧则为 $0.8^{\circ}\text{C}$ (15时,16 m)。

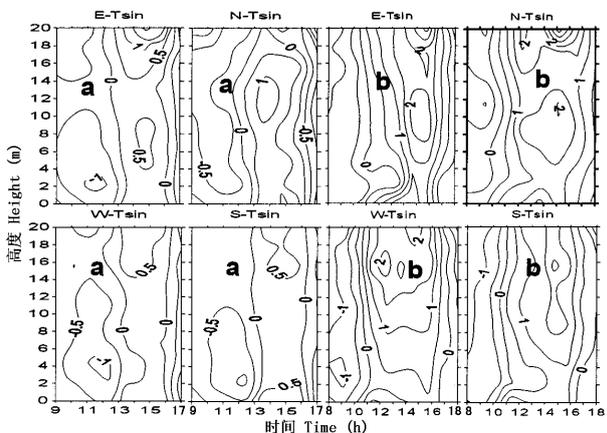


图5 雾凉季和湿热季4方位林窗边缘树表温与林内地表温差的时空分布

a: 雾凉季; b: 湿热季; E-Tsin: 东侧-林内; N-Tsin: 北侧-林内; W-Tsin: 西侧-林内; S-Tsin: 南侧-林内

Fig. 5 Temporal and spatial distribution of surface temperature difference between trunks at four azimuths edge of gap and soil surface in the interior of forest in cool-fog and hot-wet season  
a: Cool-fog season; b: Hot-wet season; E-Tsin: East minus interior; N-Tsin: North minus interior; W-Tsin: West minus interior; S-Tsin: South minus interior

在湿热季,由于雾消散时刻较雾凉季早,因而在上午11时,4方位林窗边缘各高度树表温与林内地表温差值就逐渐由负转正。并且随着太阳高度角的增大、太阳辐射的增强,差值进一步增大,先后在4方位林窗边缘不同高度树干表面都形成差值高值区。东侧差值高值区出现在树干8~12 m和20 m处,最大差值均为3.3℃(15时,12 m和16时,20 m),北侧出现在8 m和20 m处,差值最大为3.9℃(15时,20 m)。西侧和南侧的差值高值区现象也很明显,差值最大值分别为3.5℃(12时,16 m)和2.6℃(15时,16 m)。

这一结果与张一平等(2000, 2001)对西双版纳次生林林窗边缘壁面研究的结果相一致,但由于季节雨林林窗边缘树木高度高于次生林,受其影响,使得季节雨林林窗边缘树表温与林内地表温差值高值区的位置高于次生林林窗,而强度小于次生林林窗。季雨林林窗边缘树表温与林内地表温差值高值区的存在,进一步说明了林窗边缘壁面具有不可忽视的热力作用。

**3.3.2 林冠面** 由于条件所限,未能对林冠面的表面温度进行直接观测,以4方位林窗边缘和林内林冠下表面温度的平均值代表林冠面的热力效应进行分析。由图6a可见,雾凉季上午林冠下表面温度低于林内地表面,说明上午林冠面热力作用小于林内

地表面,而下午除17时外,林冠下表面温度均高于林内地表温,最大差值为2.6℃(15时)。表明当林冠面接受到太阳直接辐射后,升温速度快于林内地表面,下午绝大部分时间的热力效应强于林内地表面。

湿热季(图6b)与雾凉季情况相似,但由于湿热季雾散日出较早,太阳光照时间较长,因而在昼间的大部分时间内(11~17时)林冠下表面温度高于林内地表面,热力效应强于林内地表面。

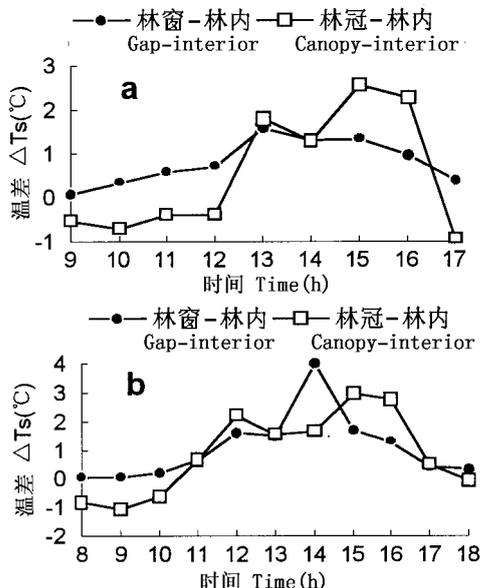


图6 雾凉季和湿热季林窗地表面、林冠面与林内地表面温差

a: 雾凉季; b: 湿热季

Fig. 6 Difference of surface temperature between soil surface of gaps and in the interior of the forest and between canopy surface and soil surface in the interior of forest

a: Cool-fog season; b: Hot-wet season

**3.3.3 林窗地表面** 从图6可知,在雾凉季(图6a)和湿热季(图6b)昼间,林窗地表温均高于林内地表温,最大差值分别为1.6℃(13时)和4.0℃(14时)。表明雾凉季和湿热季昼间林窗地表面的热力作用大于林内地表面。这主要是因为林窗地表面没有树冠的遮蔽,能够接受到较多的太阳辐射,获得较多的热量,因而表现出更强的热力效应。

另外,从图6还可看出,林冠下树表温和林窗地表面温与林内地表温的差值时间变化存在时间差。雾凉季林冠下树表温与林内地表温最大差值出现在15时,比林窗地表温与林内地表温最大差值(出现在13时)滞后约2个小时;湿热季林冠下树表温与林内地表温最大差值仍出现在15时,但林窗地表温

与林内地表温最大差值出现在 14 时,因此,滞后约 1 小时。

### 3.3.4 林窗区域各热力作用面热力效应的比较

为了进一步比较林窗区域不同热力作用面的热力效应,求算了各热力作用面的表面温度的平均值,并进行了方差分析。其中,林冠下树表温为 4 方位林窗边缘树冠下和林内林冠下树表温平均值;林窗地表温为林窗中央和 4 方位实际林窗边缘地表温的平均值;林缘树表温为 4 方位林窗边缘各高度(0.5 ~ 20 m)树表温的平均值。

比较各热力作用面的平均表温(表 1)可以看出,在雾凉季和湿热季不同时段各热力作用面的热力效应强度的变化规律十分相似。上午为林窗地表温 > 林内地表面 ≥ 林冠下方表面 > 林窗边缘壁面,而下午是林冠下方表面 ≥ 林窗地表温 > 林窗边缘壁面 > 林内地表面,并且,下午各热力作用面的热力效应强度均大于上午。

虽然湿热季各热力作用面不同时段平均表面温度均高于雾凉季,但是从下午与上午的表面温度

差来看,湿热季与雾凉季相差不大,具有相近的增温率。另外,比较各热力作用面的增温率,显示出受太阳辐射影响最大的林冠面增温速率最大,热力效应的变率最大;而林缘壁面的增温速率与林窗地面增温速率相近,超过了林内地表面。

从方差分析结果来看(表 2),无论是雾凉季还是湿热季,林窗区域不同热力作用面之间的表面温度均没有显著性差异,说明昼间林窗边缘壁面具有与其他热力作用面同等水平强度的热力效应。

## 4 小结

通过对西双版纳热带季节雨林林窗的小气候要素的观测,初步得到以下结果:

1)在西双版纳雾凉季和湿热季,季节雨林林窗边缘树干表面温度均在某一高度(其高度随方位存在差异)出现最大值,显示了林窗边缘壁面的热力效应;由于林窗边缘树木高度的影响,高值区出现的位置高于同一地区的次生林林窗,但高值区热力效应强度低于次生林林窗。林窗边缘与林内树干表面

表 1 不同热力作用面表面温度平均值(°C)

Table 1 Mean surface temperature of different thermal active surfaces

	上午 A. M.		下午 P. M.		昼间 Daytime		下午减上午 P. M. minus A. M.	
	雾凉季 Fog-cool season	湿热季 Wet-hot season	雾凉季 Fog-cool season	湿热季 Wet-hot season	雾凉季 Fog-cool season	湿热季 Wet-hot season	雾凉季 Fog-cool season	湿热季 Wet-hot season
	林内地表温 Soil surface temperature in forest (°C)	15.9	23.1	17.1	24.4	16.6	23.8	1.2
林窗地表温 Soil surface temperature in the gap (°C)	16.3	23.6	18.2	26.0	17.4	24.9	1.9	2.4
林冠下树表温 Surface temperature under canopy (°C)	15.4	23.1	18.5	26.0	17.1	24.7	3.1	2.9
林缘树表温 Trunk surface temperature on the edge of gap (°C)	15.2	22.9	17.2	25.2	16.3	24.1	2.0	2.3

表 2 不同热力作用面表面温度平均值方差分析的 F 值和概率值

Table 2 F value and probability of differences of mean surface temperature of different thermal active surfaces

季节 Season	方差来源 Source	偏差平方和 Sum of squares	自由度 df	均方 Mean square	F 值 F value	概率值 P
雾凉季 Fog-cool season	组间 Between types	2.033	3	0.678 1.172	0.578	0.645
	组内 Within types	9.373	8			
	总方差来源 Total	11.406	11			
湿热季 Wet-hot season	组间 Between types	2.137	3	0.712 1.325	0.538	0.700
	组内 Within types	10.6	8			
	总方差来源 Total	12.737	11			

温度差值的高值区出现情况也有同样规律。说明林窗边缘壁面的热力效应除与太阳高度角、太阳辐射的时间长短和强度及季节有关之外,林窗边缘树木高度也是不可忽视的因子。

2)通过各热力作用面表面温度平均值的比较及方差分析可以看出,林窗边缘壁面具有与林窗区域其他热力作用面同等水平强度的热力效应,其热力作用在昼间部分时候甚至强于林内地表面。这一结果再一次证明林窗边缘壁面是林窗区域除林冠面、林窗地表面和林内地表面之外的,一个新的、重要的热力作用面。

3)林窗边缘壁面相当强度热力效应的存在,势必导致林窗区域的热力传输差异,影响林窗的热力状况,这或许会直接对林窗内种子萌发、幼苗的生存生长以及植物的光合作用、蒸腾作用等一系列生理生长过程产生重要的作用,最终影响林窗的更新。

致谢 本研究得到了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,在观测中使用了该站的部分观测仪器,该站的段文平、刘梦楠等同志参加了观测,在此表示感谢。

## 参考文献

- 任泳红,曹敏,唐建维,唐勇,张建侯,1999. 西双版纳季节雨林与橡胶多层林凋落物动态的比较研究. 植物生态学报, **23**(5): 418 ~ 425
- 王进欣,张一平,马友鑫,刘玉洪,李佑荣,1999. 干季晴天橡胶林林窗温度剖面分布特征. 生态科学, **18**(3): 7 ~ 10
- 王正非,朱廷曜,朱劲伟,崔启武,1985. 森林气象学. 北京: 中国林业出版社, 236 ~ 252
- 翁笃鸣,陈万隆,沈觉成,高家表,1981. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 175 ~ 177
- 张克映,1966. 滇南气候的特征及形成因子的初步分析. 气象学报, **33**(2): 210 ~ 230
- 臧润国,刘静艳,董大方,1999. 林隙动态与森林生物多样性. 北京: 中国林业出版社, 51 ~ 68
- 张一平,刘玉洪,马友鑫,王进欣,1999. 西双版纳热带次生林林窗干热季气温分布特征的初步分析. 植物资源与环境, **8**(2): 7 ~ 12
- 张一平,王进欣,马友鑫,刘玉洪,2000. 西双版纳热带次生林林窗边缘树表温的时空分布. 北京林业大学学报, **22**(3): 8 ~ 13

- 张一平,王进欣,马友鑫,2001. 热带次生林林窗不同热力作用面特征分析. 应用生态学报, **12**(2): 179 ~ 184
- Bazzaz F A and Wayne P M, 1994. Coping with environmental heterogeneity: the physiological ecology of tree seedling regeneration across the gap-understory continuum. In: Caldwell M M, Pearcy R W (eds.), *Physiological Ecology—A Series of Monographs Texts and Treatises*. San Diego: Academic Press, 349 ~ 390
- Brokaw N V L, 1985. Treefalls, regrowth and community structure in tropical forests. In: Pickett S T A, White P S (eds.), *The Ecology of Nature Disturbance and Patch Dynamics*. New York: Academic Press, 53 ~ 69
- Brokaw N V L and Scheiner S M, 1989. Species composition in gaps and structure of a tropical forest. *Ecology*, **70**(3): 538 ~ 541
- Brown N, 1993. The implications of climates and gap microclimate for seedling growth condition in a Bornean lowland rain forest. *Journal of Tropical Ecology*, **9**: 153 ~ 168
- Canham C D, Denslow J S, Platt W J, Runkle J R, Spies T A and White P S, 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forest. *Canada Journal of Forest Resource*, **20**: 620 ~ 631
- Clark D B, 1990. The role of disturbance in the regeneration of neotropical moist forest. In: Bawa K S, Hadley M (eds.), *Reproductive Ecology of Tropical Forest Plants*. Paris: MAB-UNESCO Series, **7**: 291 ~ 315
- Connell J H, 1989. Some processes affecting the species composition in forest gaps. *Ecology*, **70**(3): 560 ~ 562
- Denslow J S, 1980. Gap partitioning among tropical rainforest trees. *Biotropica*, **12**: 47 ~ 55
- Runkle J R, 1982. Patterns of disturbance in some old-growth mesic forests of eastern North America. *Ecology*, **62**(4): 1041 ~ 1051
- Schupp E W, Home H F, Augspurger C K and Levey D J, 1989. Arrival and survival in tropical treefall gaps. *Ecology*, **70**(3): 562 ~ 564
- Watt A S, 1947. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, **35**: 1 ~ 22
- Whitmore T C, 1978. Gaps in the forest canopy. In: Tomlison P B, Zimmermann M H (eds.), *Tropical Trees as Living Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 639 ~ 655
- Whitmore T C, 1989. Canopy gaps and the two major groups of forest trees. *Ecology*, **70**(3): 536 ~ 538
- Whitmore T C, 1990. *An Introduction to Tropical Rain Forest*. Oxford: Clarendon Press, 23 ~ 28, 99 ~ 132

(责任编辑: 闫文杰)