

## 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究

刘文杰<sup>1,2</sup> 张一平<sup>1</sup> 李红梅<sup>1</sup> 段文平<sup>1</sup>

(1 中国科学院西双版纳热带植物园热带雨林生态站, 云南勐腊 666303)

(2 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘要** 利用4年(1999~2002)的雾观测资料,对西双版纳热带季节雨林内雾特征进行了观测研究。结果表明,雾首先形成于最上林冠层,林下雾是由上层雾变浓、下沉而来。夜间,雾形成前,气温高于叶表温;雾形成后,气温则低于叶表温。热带雨林内各季节雾日数和雾日频率均高于无林地。热带雨林内平均全年雾日数可达258 d,其中雾季和干热季共占154 d(59.6%),而雾季的雾日频率高达90%。雾日数的季节变化与各季节雨量呈明显的负相关。雾季,雾在23 00左右生成,比干热季、雨季分别提前0.7、2.3 h,而消散时间则分别推迟0.8、2.2 h。雾生成和消散时间呈现出较明显的负相关。雾季雾的持续时间达12.2 h·d<sup>-1</sup>,比干热季、雨季分别长1.5、4.6 h·d<sup>-1</sup>。全年雾总持续时间占全年时间的39.7%,而雾季的相应值为50.8%。雾的形成不仅凝结了水汽进入森林(全年89.4 mm),同时也对森林起到了一定的保温作用,这对热带雨林的生存和发展具有至关重要的作用。

**关键词** 雾频率 持续时间 小气候特征 热带季节雨林

FOG CHARACTERISTICS IN A TROPICAL SEASONAL RAIN FOREST  
IN XISHUANGBANNA, SOUTHWEST CHINALIU Wen\_Jie<sup>1,2</sup> ZHANG Yi\_Ping<sup>1</sup> LI Hong\_Mei<sup>1</sup> and DUAN Wen\_Ping<sup>1</sup>

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China)

(2 Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract** Fog frequency and duration were measured between November 1998 and February 2003 in a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. The amount of fog and dew precipitation was measured daily using twelve bottle funnel collectors set in a random pattern on the forest floor. Related microclimatic variables including air temperature, relative humidity, wind speed, solar radiation and rainfall were recorded by a meteorological observation system mounted on a 72 m tall meteorological tower in the study site. At night the fog occurred first at the top layer of the canopy, and then a thick fog penetrated the understory. Before fog occurred, the air temperature was greater at 0.5 m above the canopy than on the canopy surface but was lower after fog occurred. The number of fog days was much higher inside the rain forest (258 days/year) than in open areas (188 days/year). Fog frequency in the rain forest was 90% during the foggy season (November–February), slightly lower (78.7%) in the dry\_hot season (March–April), and lowest (55.4%) in the rainy season (May–October). The number of fog days in each season was negatively correlated with the amount of rainfall. The onset of fog occurred on average at 2300 and lifted at 1100 hours during the foggy season. During the dry\_hot season and rainy season, the fog occurred 0.7 and 2.3 hours later and lifted 0.8 and 2.2 hours earlier, respectively. Meanwhile, there was a negative correlation between the time of fog occurrence and lift. Average fog duration per day during the foggy season was 12.2 hours, and was 1.2 and 1.6 times longer than average fog duration of the dry\_hot and rainy season, respectively. During the study period, the absolute amount of mean annual fog and dew precipitation was  $(89.4 \pm 13.5)$  mm (mean  $\pm$  SD), which was  $4.9\% \pm 1.7\%$  of the annual precipitation. Of the total annual amount of fog and dew precipitation,  $85.9\% \pm 6.6\%$  was collected during the foggy season and dry\_hot season. The results suggest that fog, which both condenses water vapor into available precipitation in the forest and buffers temperature changes, plays an important role in the hydrology of the forest, especially during the foggy and dry\_hot seasons. Therefore, horizontal precipitation (fog interception) needs to be included in calculations of the water balance in this forest. These results also demonstrate the importance of understanding the impacts of climate factors, and have important implications for ecologists and hydrologists interested in fog-inundated ecosystems.

**Key words** Fog frequency, Fog duration, Fog interception, Microclimatic factors, Tropical seasonal rain forest

收稿日期: 2003-03-06 接受日期: 2003-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(30100019)、云南省应用基础研究基金(2001C0023Q 和 2003C0009Z)和中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1.SW.01.01A)

E-mail: lwj@xtbg.org.cn; lwj6932002@yahoo.com.cn

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在世界一些多雾的山地和沿海森林生态系统中, 雾降水(Fogwater, Occult precipitation or, Horizontal precipitation)一直被认为是一种极其重要的水文和化学输入项, 其生态效应是多方面的(Dallard *et al.*, 1983; Unsworth & Crossley, 1987; Asbury *et al.*, 1994; Ishibashi & Terashima, 1995; Monteith & Unsworth, 1990; Ingraham & Matthews, 1988)。雾的形成不仅凝结水汽(Ingraham & Matthews, 1988)、沉降养分(Weathers & Likens, 1997)进入森林, 同时也释放了凝结潜热而减弱了降温强度(刘文杰等, 2001), 及缩短了日照时数而消减蒸发散, 这对缓解植物干旱、补充养分不足、减弱因低温加剧的光抑制等方面具有重要作用(Ishibashi & Terashima, 1995)。由于雾水作为森林水文、化学循环的关键环节而影响养分循环模式(Weathers & Likens, 1997), 因而频繁的雾是决定某些山地和沿海森林分布及特征的重要因子, 尤其是在热带森林分布地区(Gordon *et al.*, 1994b)。例如, 低地山地雨林(Lower montane rainforest)总是被频繁的雾弥漫, 而高地山地雨林(Upper montane rainforest)则更多地被频繁、持久的雾所笼罩, 这两种森林均被称为热带山地多雾林(Tropical montane cloud forest)(Grubb & Whitemore, 1966)。这些热带山地多雾林林冠截留的雾水可达全年降水量(雾水+ 雨水)的2.4%~60.6%(Cavelier & Goldstein, 1989; Cavelier *et al.*, 1996), 而雾水中化学离子浓度为雨水中相应离子的2~24倍(Asbury *et al.*, 1994; Clark *et al.*, 1998a; Gordon *et al.*, 1994a; Weathers & Likens, 1988), 可提供全年养分输入(雨水+ 雾水)的8%~30%(Asbury *et al.*, 1994)。

西双版纳热带雨林是在水分、热量、海拔均达到极限条件下的热带北缘季节雨林群落, 热带雨林受到了季节干旱和冬季低温的影响(朱华, 1992)。但本区是有名的静风(年均风速 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、多雾(年雾日 $>170\text{ d}$ )区, 雾季和干热季多有辐射雾出现, 雾总持续时间占雾季和干热季时间的40%以上(刘文杰等, 1996), 尤其是在热带雨林覆盖区, 辐射雾更是频繁出现。因而, 雾所塑造的温湿环境必定对热带雨林的生存和发展起到一定的作用。有关西双版纳地区热带雨林内雾特征的研究仍属空白。本文着重于热带雨林内雾频率、持续时间、截留量及雾形成的小气候特征的研究, 为热带森林内雾水的水文和化学效应的深入研究提供参考。

## 1 样地自然环境及群落特征

观测点设在中国生态系统研究网络西双版纳热

带季节雨林定位观测样地(热带雨林面积约 $3\text{ km}^2$ )内( $21^{\circ}56'\text{ N}$ ,  $101^{\circ}15'\text{ E}$ ), 海拔750 m, 观测点与雨林边缘平坝区相对高差约150 m。该区属热带北缘西南季风气候, 一年中有干季[包括雾季(11~2月)、干热季(3~4月)]、雨季(5~10月)之分(张克映, 1963)。年均气温 $21.7^{\circ}\text{ C}$ , 年均风速 $0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 年均相对湿度86%, 年降雨量1700 mm, 其中雨季占83%~87%, 干季占13%~17%。

观测样地所在的热带季节雨林, 其群落高度35 m左右, 乔木层按高度可分为3层: 上层优势种为番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*); 中层常见种有云南玉蕊(*Barringtonia macrostachya*)、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)、山蕉(*Mitrophora maingayi*)等; 下层树种主要有染木(*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)、玉叶金花(*Mussaenda* sp.)等, 群落结构特征详见文献(Cao & Zhang, 1996)。

## 2 观测方法

采用小气候梯度观测法, 将MAOS\_1全自动小气候观测系统(包括4层温度、湿度、风速; 1层土壤热通量、辐射各分量、管状辐射表、雨量计)(长春气象仪器研究所生产)及10套TR\_71型自记温湿度计(日本TAND株式会社生产)安装在热带雨林定位样地梯度观测铁塔上(塔高72 m), 观测雾形成的小气候特征。针对热带雨林3个乔木冠层I、II、III(简称冠层I、冠层II、冠层III, 高分别约33 m、20 m、5 m), 在冠层I以上0.5 m布设一层温、湿、风传感器及辐射传感器(总辐射、反射辐射、净辐射), 在冠层II、冠层III以上0.5 m及铁塔顶部各布设一层温、湿、风传感器(采集频度 $1\text{次}\cdot\text{h}^{-1}$ , 自1996年11月至2003年3月), 10套温湿度计自林下地表至林冠以上按3 m间距布设(采集频度 $1\text{次}\cdot 10\text{ min}^{-1}$ , 1999年1月2日至5日)。用COMPAC3型红外辐射温度计(日本Minolta株式会社生产)人工观测最上层林冠叶表面温度(采集频度 $1\text{次}\cdot\text{h}^{-1}$ , 1999年1月2日至5日), 每次测定20张叶片读数取平均值。在热带雨林样地和距其约5 km的无林地气象辐射站(海拔560 m)进行每日(7:00~24:00)雾形成、消散时间的人工观测。夜间1:00~6:00, 则采用近地表层(无林地)和林冠层处(热带雨林)的温度、湿度和辐射判别雾生成时间(刘文杰等, 2001), 即: 气温略升高、相对湿度达100%、近地层或林冠向上的长波辐射陡减, 如无降雨发生, 则判断为雾形成, 并参考

早晨人工观测的结果。同时,在热带雨林内距地表 0.7 m 高处水平随机安置 12 个口径 0.8 m 的塑料漏斗承接林冠滴落的雾露水,每日 9:00 左右(林冠截留的雾露水停止滴落时)测定雾露水量,并清除漏斗内杂物、水平调整漏斗,雾露水和雾日的观测自 1998 年 11 月 1 日至 2003 年 3 月 31 日。该区辐射雾形成之前总是有露水首先出现(刘文杰等,1996),但仅有露水而没有雾出现的天气里,林下收集不到滴落水,因此收集到的滴落水总是雾水和露水之和。如果夜间出现降雨,则次日雾露水量视为 0,这可能会过低估计雾露水总量。但是,在有云雨的夜间,因地表的长波辐射降温受到了极大削弱,辐射雾形成的可能性较小(刘文杰等,1996),因此,未测到的雾露水量很少。雾日定义为水平能见度 < 1 km 及至少持续 15 min (Gordon *et al.*, 1994b),事实上,本区雾多在夜间 11:00~1:00 生成,至次日 10:00~11:00 才消散。

3 结 果

3.1 雾形成的小气候特征

表 1 为林内和林上最高、最低空气温度及相对

湿度分布。可看出,昼间林冠层 I 为一明显热源,冠层最高气温可较林下近地表面高出 6~7℃,林下为逆温分布;夜间,林冠层 I 为一明显冷源,其最低温度可较林下地表面低 2~3℃,林下为绝热温度分布。夜间的这种温度分布形式极有利于雾首先在林冠层 I 处生成,因为当林下温度较高时,林冠层 I 的温度已降到露点温度并逐渐形成雾。由图 1 可看出,18:00 时以后(日落),冠层 I 的叶表温( $T_s$ )低于气温( $T_a$ ),并且叶温与气温同步下降。22:00 时,叶表面形成少量露滴(因为叶表层高湿低温),此时冠层空气水汽压也略有下降(图 2)。随着叶表温及气温的进一步降低,到夜间 23:00 时,气温及叶温均已降低到低于露点温度,此时叶表面凝结了较多的露滴,且冠层处已有明显的雾形成。此后雾不断加浓加重,下沉弥漫到林下,而且随着雾层对林冠层长波有效辐射的削弱(图 3),叶表温开始高于气温(图 1)。由图 2 可看出,当空气相对湿度接近于饱和、饱和差趋近于 0 时,由于雾的形成,水汽压不断下降,到 8:00 时,水汽压降到最低(约下降 100 Pa),日出后,随着雾的消散,相对湿度下降,水汽压及饱和差相应升高。

表 1 热带雨林林内和林上最高、最低空气温度及相对湿度分布(1999 年 1 月 2~5 日)

Table 1 Maximum and minimum air temperature (°C) and air relative humidity (%) in and above tropical rain forest during 2~5 January 1999

高度 Height (m)	0 <sup>a</sup>	0.5	6	12	18	24	30	33 <sup>b</sup>	36	45
$T_{\max}$	21.0	21.2	21.6	22.2	22.5	23.3	25.2	27.4	25.9	22.8
$T_{\min}$	17.1	15.9	15.5	15.3	15.0	14.9	14.0	13.8	14.8	15.2
$T_{\text{range}}$	3.9	5.3	6.1	6.9	7.5	8.4	11.2	13.6	11.1	7.6
$RH_{\max}$	—	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$RH_{\min}$	—	88	75	73	70	67	65	63	61	64
$RH_{\text{range}}$	—	12	25	27	30	33	35	37	39	36

$T$ 、 $RH$ 、max、min、range 分别表示温度、相对湿度、最高、最低及日较差  $T$ ,  $RH$ , max, min and range represent temperature, relative humidity, maximum, minimum and daily range, respectively a: 地表 Ground surface b: 林冠层 Canopy layer

图 3 表明,进入夜间后,土壤热通量负值不断增大(地面发射长波有效辐射加热地表层空气),到夜间 23:00 雾形成后,由于受到雾层对长波有效辐射的削弱,土壤热通量负值减小,此后缓慢变小。冠层 I 处的净辐射在进入夜间后,其负值也是不断增大,随着冠层热量的不断散失,23:00 雾形成后,受雾影响其值急剧减小,此后变缓。因而,雾的形成不仅凝结了水汽进入森林,同时对林冠及林下也起到了一定的保温作用。

3.2 雾日数和雾日频率

在热带雨林内和无林地,雾日数及雾日频率有明显的季节变化(表 2)。雾季,热带雨林内雾日数及雾日频率最多(高),月均雾日数可达 27 d(90%)。

比干热季的相应值多 3 d,比雨季多 10 d。在无林地,各季节雾日数及频率均明显低于热带雨林内的值,雾季、干热季和雨季平均每月少 4、6、7 d。热带雨林内全年雾日数可达 258 d(70.7%),比无林地多 70 d。热带雨林内雾日的这种季节变化与各季的降雨量呈明显的负相关(图 4)。在本地区,降雨多,则阴雨天气多,而阴雨天不利于辐射雾的形成(刘文杰等,1996),因而雾日少,反之亦然。在观测期间,2002 年的降雨最多(1 948.7 mm),其年雾日数最少(211 d);2000 年降雨最少(1 405.5 mm),其年雾日数最多(307 d)。西双版纳热带雨林内全年雾日数的季节分布特点,无疑是本地区气候、地形和植被状况的综合反映。雾季和干热季,西南季风退缩,该区高

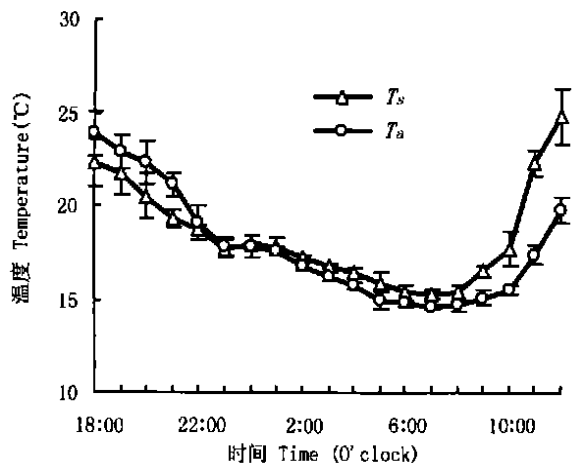


图 1 林冠层 I 0.5 m 处气温 ( $T_a$ ) 及叶表温 ( $T_s$ ) 变化特征 (1999 年 1 月 2~5 日)

Fig. 1 Variation of air temperature ( $T_a$ ) and leaf surface temperature ( $T_s$ ) at 0.5 m above the canopy I during 2-5 January 1999

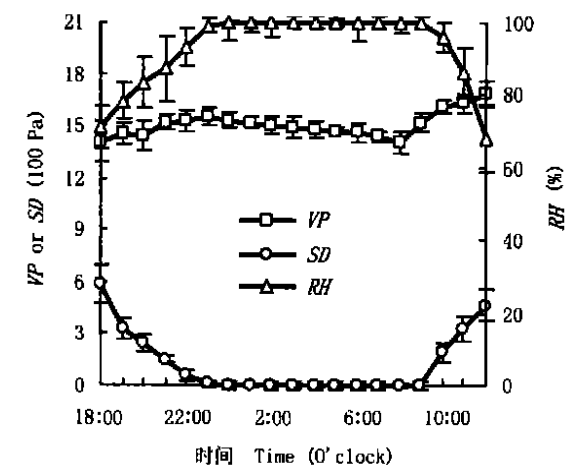


图 2 林冠层 I 0.5 m 处空气湿度变化特征 (1999 年 1 月 2~5 日)

Fig. 2 Variation of air humidity at 0.5 m above the canopy I during 2-5 January 1999

VP: 水汽压 Vapour pressure SD: 饱和差 Saturation deficit RH: 相对湿度 Relative humidity

层大气受西风带南支西风急流控制 (张克映, 1963), 因独特的地形条件作用, 低层大气稳定、干燥, 云量稀少, 辐射雾可频繁出现, 且雾生成和消散时间较稳定、雾层厚、范围广; 雨季, 西南暖湿气流为该区带来了充沛的雨水, 雨日多、空气湿度大。在雨季少云的夜间, 因湿热空气沿森林覆盖山体的抬升降温, 雾也极易形成, 但雾层较薄、范围较小。与世界其它热带森林地区相比, 该区雾日数略少。Gordon 等 (1994a) 报道, 在位于委内瑞拉的加拉卡斯附近的两处热带森林内, 全年雾日数分别达 325、310 d, 但雾多持续在白天 (7: 00~ 20: 00), 平均持续时间为 4.5~ 8. 6 h, 少于本区雾持续时间 (表 3)。Sugden (1982) 则在委内瑞拉的马加利塔岛热带森林内的观测发现, 271

d 的观测中只有 7 d 没有雾。同时, Sugden (1986) 在哥伦比亚的 Serrania de Macuica 热带森林内观测发现, 雾在 3~ 5 月的夜间出现频率为 95%, 平均持续时间  $12.5 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ , 这与该区雾季的雾相当。

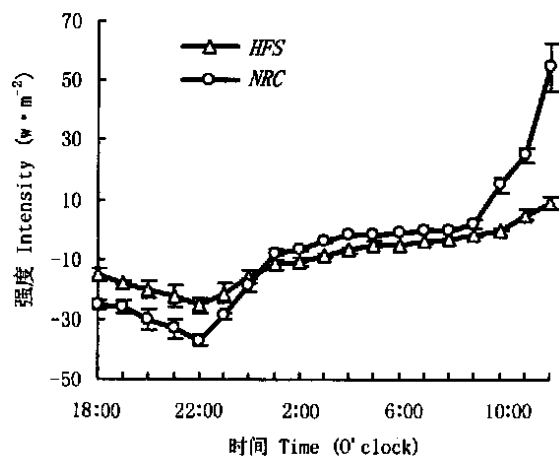


图 3 夜间土壤热通量 (HFS) 及林冠层 I 0.5 m 处净辐射 (NRC) 变化特征 (1999 年 1 月 2~5 日)

Fig. 3 Variation of heat flux in soil (HFS) and net radiation at 0.5 m above canopy I (NRC) in the night during 2-5 January 1999

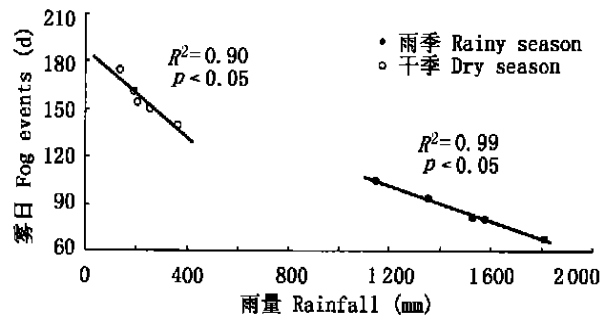


图 4 热带雨林内雾日数与降雨量的关系

Fig. 4 Relationships between fog events and rainfall for the tropical seasonal rain forest

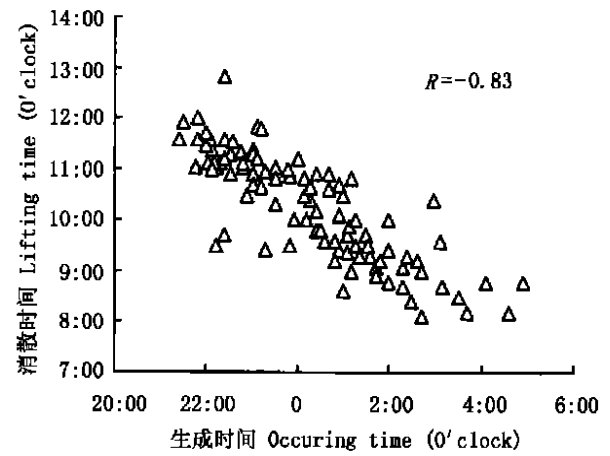


图 5 热带雨林内雾生成与消散时间的关系 (1999 年)

Fig. 5 Relationship between occurring time and lifting time of fog for tropical rain forest in 1999

表 2 热带雨林和旷地各季节月平均雾日数(d)和雾日频率(%)  
Table 2 Monthly average fog events (d) and frequency (%) in different season at tropical rain forest and opening

项目 Items	雾季 Foggy season		干热季 Dry_hot season		雨季 Rainy season		全年 Whole year	
	雨林 Forest	旷地 Openning	雨林 Forest	旷地 Openning	雨林 Forest	旷地 Openning	雨林 Forest	旷地 Openning
雾日数 Fog events	27±4	23±4	24±6	18±6	17±5	10±6	258±58	188±60
雾日频率 Frequency	90.0±13.3	76.7±10.0	78.7±19.7	59.0±19.7	55.4±16.3	32.6±19.6	70.7±15.9	51.5±16.4

表内数据为平均值±标准差, 样本数为4 Entries are means±standard deviation(SD) (n=4)

表 3 热带雨林内各季节平均雾生成、消散和持续时间  
Table 3 Seasonal average occurring time, lifting time, and duration of fog in the tropical seasonal rain forest

季节 Season	生成时间 Occuring time	消散时间 Lifting time	日持续时间 Daily duration (h)	总持续时间/ 季节时间 Total duration/Whole season (%)
雾季 Foggy season	23:02 (±1.4 h)	11:13 (±0.5 h)	12.2 (±1.9)	50.8 (±7.9)
干热季 Dry_hot season	23:42 (±1.7 h)	10:22 (±0.7 h)	10.7 (±2.4)	44.6 (±10.0)
雨季 Rainy season	1:21 (±2.3 h)	8:55 (±1.1 h)	7.6 (±3.4)	31.7 (±14.2)

表内数据为平均值±标准差, 样本数为4 Entries are means±standard deviation (SD) (n=4)

表 4 热带雨林内各季节雾露降水(FD)和降雨(R)分布  
Table 4 Seasonal distribution of fog and dew precipitation (FD) and rainfall (R) in the tropical seasonal rain forest

项目 Items	雾季 Foggy season	干热季 Dry_hot season	雨季 Rainy season	全年 Whole year
FD (mm)	56.2±5.2	20.6±4.0	12.6±2.4	89.4±13.5
R (mm)	114.7±34.3	62.2±18.3	1531.3±182.0	1717.8±206.2
FD/(R+FD) (%)	32.9±4.2	24.9±2.7	0.8±0.2	4.9±1.7

表内数据为平均值±标准差, 样本数为4 Entries are means±standard deviation (SD) (n=4)

3.3 雾生成、消散和持续时间

本区热带雨林内的雾通常在夜间形成, 可持续到次日上午, 但各季节生成和消散时刻不同(表3)。雾季, 雾在 23:00 左右生成, 次日 11:00 左右消散。干热季, 雾生成时间比雾季推迟约 0.7 h, 但消散时间却提前约 0.8 h。雨季, 热带雨林内雾的生成大部分是由于夜间雨林内湿热空气沿山体的抬升降温所致(刘文杰等, 1996), 雾生成时间更推迟(2.3 h), 雾消散也较快(比雾季提前约 2.2 h)。雾季和干热季, 由于夜间风速小、云量少, 空气降温快, 辐射雾极易生成, 且生成时间早、雾层厚、范围广, 相应雾的消散时间也较迟。就全年来看, 雾生成和消散时间呈现出较明显的负相关( $R = -0.83$ )(图5), 即: 雾生成时间越早, 消散时间则越晚, 反之亦然。

图6为各季节雾生成和消散时间的累积频率分布曲线, 根据图解内插法(么枕生, 1981), 由图求得雾季、干热季和雨季雾生成时刻 50% 的分位数, 分别为 23:13、23:54、1:45, 即: 各季节在相应分位数对应的时刻前, 雾生成的保证率有 50%。同理, 各季节有 90% 保证率的雾生成时间分别为 0:20、0:55、2:40 之前。对雾消散而言, 雾季、干热季和雨季有 50% 保证率的雾消散时间分别为 11:20、10:45、09:25 之前, 有 90% 保证率的时间分别为 11:30、11:05、10:00 之前。由图6还可看出, 雾季和干热季

雾生成和消散时间的频率分布较相近, 雨季与二者有明显的不同。

雾的日持续时间同样反映了明显的季节差别(表3)。雾季雾的平均持续时间约  $12.2\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , 多于干热季  $10.7\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ , 多于雨季  $7.6\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。各季节雾总持续时间分别占相应季节总时间的 50.8%、44.6%、31.7%。

3.4 雾露降水量

热带季节雨林内全年由林冠截留的雾露降水达 89.4 mm, 占全年降水量(雨水+雾露水)的 4.9%, 而雾季和干热季的相应值分别为 32.9% 和 24.9%(表4)。其中, 雾季和干热季的截留雾露水分别占总截留雾露水的 85.9%, 而雾季占 62.9%。在观测期间, 2002 年的降雨最多(1948.7 mm), 其截留雾露水最少(75.9 mm); 2000 年降雨最少(1405.5 mm), 其截留雾露水最多(102.9 mm)。因而, 对此热带季节雨林而言, 雾露水在雨水较少的年份可能具有更为重要的意义。

该地区热带季节雨林内全年由林冠截留的雾露水占全年降水量的 4.9%, 远低于 Cavellier 和 Goldstein (1989) 在哥伦比亚 Serrania de Macuira 测定的 48% 和 Clark 等(1998b)在哥斯达黎加 Monteverde 测定的 28%, 略低于 Baynton (1989) 在波多黎哥 Pico Del Oeste 测定的 7.2%、Cavellier 和 Goldstein (1989)

在巴拿马 Cordillera Central 测定的 8%。这种雾露水截留量的差别是各自森林内雾状况、环境因子和群落结构特征的综合反映。影响雾露水截留量多少的因子有风速、相对湿度、温度、雾的液态水含量、平均雾滴直径、林冠结构等(Lovett *et al.*, 1982)。西双版纳地区辐射雾的液态水含量和平均雾滴直径分别为 0.12~ 0.25  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 8.0~ 13.6  $\mu\text{m}$  (黄玉仁等, 2001), 均达到了形成雾水截留所要求的条件(液态水含量 $> 0.15 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均雾滴直径 $> 5.2 \mu\text{m}$ ) (Asbury *et al.*, 1994), 但该区的风速较小(年均风速 0.7

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。在风速较小时, 辐射雾雾滴主要以重力沉降形式到达林冠层, 而风携带雾滴与林冠的碰并作用则为次要形式(Lovett, 1984)。因而, 较小的风速可能是导致该区热带季节雨林雾水截留量较少的主要原因之一。例如, Baynton (1989) 和 Asbury 等 (1994) 在波多黎哥 Pico Del Oeste 测定结果表明, 尽管此地区雾的液态水含量仅为 0.016  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 但风速通常  $> 5.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 年雾水截留量仍占年降水的 9%, 日雾水截留量可达 1.3 mm。

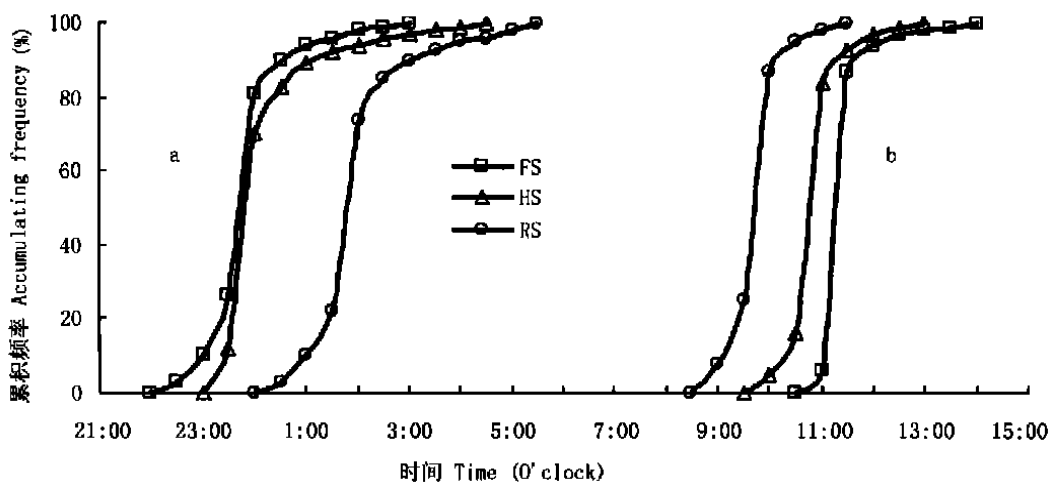


图6 各季节雾生成(a)和消散(b)时间的累积频率分布曲线(1999年)

Fig. 6 Seasonal distribution curves of accumulating frequency for the occurring (a) and lifting (b) time of fog for tropical rain forest in 1999  
FS: 雾季 Foggy season HS: 干热季 Dry-hot season RS: 雨季 Rainy season

## 4 结 论

热带雨林最上层林冠既是雾形成的决定层, 又是雾的首先形成层, 林下雾是由上层雾变浓下沉而来。雾露的形成不仅凝结了水汽进入森林, 同时也对森林起到了一定的保温作用。夜间, 雾形成前, 气温高于叶表温; 雾形成后, 气温则低于叶表温。热带雨林内各季节雾日数和雾日频率均多(或高)于无林地。热带雨林内平均全年雾日数可达 258 d, 其中雾季和干热季共占 154 d(59.6%), 而雾季的雾日频率高达 90%。雾日数的季节变化与各季节雨量呈明显的负相关。雾季, 雾在 23:00 左右生成, 比干热季、雨季分别提前 0.7、2.3 h, 而消散时间则分别推迟 0.8、2.2 h。雾生成和消散时间呈现出较明显的负相关。雾季雾的持续时间达 12.2  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ , 比干热季、雨季分别长 1.5、4.6  $\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$ 。全年雾总持续时间占全年时间的 39.7%, 而雾季的相应值为 50.8%。全年由林冠截留的雾露降水达 89.4 mm, 占全年降水量的 4.9%。

本区雾季和干热季, 占比较较高的雾露降水(表 4), 无疑为热带雨林内植物的生长补充了水分。另一方面, 该区雾季和干热季的降雨多为短时雷阵雨, 对植物利用来说, 其有效性无疑远低于缓慢滴落到林下土壤内的雾露降水。同时, 雾季和干热季白天持续到 11:00 左右的浓雾, 极大地缩短了日照时数, 因而也相对减少了森林的蒸发散量, 缓解了植物所需水分的不足, 这对该区热带雨林生态系统的健康生长和维持无疑是至关重要的。

## 参 考 文 献

Asbury, C. E., W. H. McDowell, R. Trinidad-Pizarro & S. Berrios. 1994. Solute deposition from cloud water to canopy of a Puerto Rican montane forest. *Atmospheric Environment*, **28**: 1773 ~ 1780.  
Baynton, H. W. 1989. The ecology of an elfin forest in Puerto Rico, 3. Hilltop and forest influences on the microclimate of Pico del Oeste. *Journal of the Arnold Arboretum*, **50**: 80~ 92.  
Cao, M. & J. H. Zhang. 1996. Tree species composition of a seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Tropical Ecology*, **37**: 183~ 192.  
Cavelier, J. & G. Goldstein. 1989. Mist and fog interception in

- elfin cloud forest in Colombia and Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, **5**: 309~ 322.
- Cavelier, J., D. Solis & M. A. Jaramillo. 1996. Fog interception in montane forest across the Central Cordillera of Panama. *Journal of Tropical Ecology*, **12**: 357~ 369.
- Clark, K. L., N. M. Nadkarni, D. Schaefer & M. L. Gholz. 1998a. Cloud water and precipitation chemistry in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica. *Atmospheric Environment*, **32**: 1595~ 1603.
- Clark, K. L., N. M. Nadkarni & D. Schaefer. 1998b. Atmospheric deposition and net retention of ions by the canopy in a tropical montane forest, Monteverde, Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, **14**: 27~ 45.
- Dallard, G. J., M. H. Unsworth & M. J. Harve. 1983. Pollutant transfer in upland regions by occult precipitation. *Nature*, **302**: 241~ 243.
- Gordon, C. A., R. Herrera & T. C. Hutchinson. 1994a. Studies of fog events at two cloud forests near Caracas, Venezuela. I. Frequency and duration of fog. *Atmospheric Environment*, **28**: 317~ 322.
- Gordon, C. A., R. Herrera & T. C. Hutchinson. 1994b. Studies of fog events at two cloud forests near Caracas, Venezuela. II. Chemistry of fog. *Atmospheric Environment*, **28**: 323~ 337.
- Grubb, P. J. & T. C. Whitmore. 1966. A comparison of montane and lowland rain forest in Ecuador. II. The climate and its effects on the distribution and physiognomy of forest. *Journal of Ecology*, **54**: 303~ 333.
- Huang, Y. R. (黄玉仁), Y. Shen(沈鹰) & Y. S. Huang(黄玉生). 2001. Effects of urbanization on radiation fog in Xishuangbanna area. *Plateau Meteorology(高原气象)*, **20**: 186~ 190. (in Chinese with English abstract)
- Ingraham, N. L. & R. A. Matthews. 1988. Fog drip as a source of groundwater recharge in Northern Kenya. *Water Resource Research*, **24**: 1406~ 1410.
- Ishibashi, M. & I. Terashima. 1995. Effects of continuous leaf wetness on photosynthesis: adverse aspects of rainfall. *Plant, Cell and Environment*, **18**: 431~ 438.
- Liu, W. J. (刘文杰) & H. M. Li(李红梅). 1996. The fog resource in Xishuangbanna of China and its evaluation. *Journal of Natural Resources(自然资源学报)*, **11**: 263~ 267. (in Chinese with English abstract)
- Liu, W. J. (刘文杰), K. Y. Zhang(张克映), C. M. Wang(王昌命), H. M. Li(李红梅) & W. P. Duan(段文平). 2001. The microclimate of dew and fog formation on canopy layer in the dry season in Xishuangbanna tropical rain forest. *Acta Ecologica Sinica(生态学报)*, **21**: 165~ 170. (in Chinese with English abstract)
- Lovett, G. M. 1984. Rates and mechanisms of cloudwater deposition to a subalpine balsam fir forest. *Atmospheric Environment*, **18**: 361~ 371.
- Lovett, G. M., W. C. Reiner & R. K. Olson. 1982. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forest: hydrological and chemical inputs. *Science*, **218**: 1303~ 1304.
- Monteith, J. L. & M. H. Unsworth. 1990. *Principles of environmental physics*. 2nd ed. London: Edward Arnold. 78~ 90.
- Sugden, A. M. 1982. The vegetation of the Serrania de Macuira Guajira, Colombia: a contrast of arid lowland and an isolated cloud forest. *Journal of the Arnold Arboretum*, **63**: 1~ 30.
- Sugden, A. M. 1986. The montane vegetation and flora of Margarita Island, Venezuela. *Journal of the Arnold Arboretum*, **67**: 187~ 232.
- Unsworth, M. H. & A. Crossley. 1987. Capture of wind-driven cloud by vegetation. In: Coughtrey, P. J., M. H. Martin & M. H. Unsworth eds. *Pollutant transport and fate in ecosystems*. Oxford, UK: Blackwell. 125~ 127.
- Weathers, K. C. & G. E. Likens. 1997. Clouds in Southern Chile: an important source of nitrogen to nitrogen-limited ecosystems. *Environmental Science and Technology*, **31**: 210~ 213.
- Weathers, K. C. & G. E. Likens. 1988. Cloud water chemistry from ten sites in North America. *Environmental Science and Technology*, **22**: 1018~ 1026.
- Yao, Z. S. (幺枕生). 1981. *Climatical statistics*. Beijing: Science Press. 102~ 110. (in Chinese)
- Zhang, K. Y. (张克映). 1963. An analysis on the characteristics and forming factors of climates in the south part of Yunnan. *Acta Meteorologica Sinica(气象学报)*, **33**: 210~ 230. (in Chinese with English abstract)
- Zhu, H. (朱华). 1992. Research of community ecology on *Shorea chinensis* forest in Xishuangbanna. *Acta Botanica Yunnanica(云南植物研究)*, **15**: 34~ 46. (in Chinese with English abstract)

责任编辑: 周广胜 责任编辑: 姜联合