

DOI: 10.5846/stxb201806291435

张晶, 宋清海, 张一平, 邓云, 武传胜. 西双版纳热带雨林与哀牢山亚热带常绿阔叶林雾的特征研究. 生态学报, 2018, 38(24): - .

Zhang J, Song Q H, Zhang Y P, Deny Y, Wu C S. Characteristics of fog in Xishuangbanna tropical rainforest and Ailaoshan subtropical evergreen broad-leaved forest. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): - .

西双版纳热带雨林与哀牢山亚热带常绿阔叶林雾的特征研究

张 晶^{1,2}, 宋清海^{2,*}, 张一平², 邓 云^{2,3}, 武传胜⁴

1 中国科学院大学, 北京 100049

2 中国科学院热带森林生态学重点实验室, 勐仑 666303

3 中国科学院西双版纳热带雨林生态系统研究站, 勐仑 666303

4 环境激素与生殖发育安徽省重点实验室, 阜阳师范学院, 阜阳 236037

摘要: 以西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林为研究对象, 利用 PWS100 天气现象仪获取两种森林类型的能见度数据。基于 2014 年西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林的能见度数据, 对两种森林类型雾的特征进行定量研究。研究结果表明: (1) 西双版纳热带雨林全年雾日数为 196 d, 占全年的 53.7%, 哀牢山亚热带常绿阔叶林全年雾日数为 100 d, 占全年的 27.4%, 热带雨林全年雾日数几乎为亚热带常绿阔叶林雾日数的两倍; (2) 热带雨林雨季和干季各占 28.06% 和 71.94%, 而亚热带常绿阔叶林雨季和干季各占 72% 和 28%; (3) 热带雨林一日雾持续的最长时间为 10.5 h, 而亚热带常绿阔叶林雾生成和消散时间不定, 一日内雾最长持续时间可达 24 h, 但雾发生的频率低于西双版纳热带雨林。两种森林类型全年雾日特征有明显的差异性, 通过定量评价地处过渡带上的两种多雾森林生态系统雾特征, 可为未来气候变化对不同森林生态系统碳水交换影响提供数据支撑。

关键词: 雾频率; 雾日数; 热带雨林; 亚热带常绿阔叶林

Characteristics of fog in Xishuangbanna tropical rainforest and Ailaoshan subtropical evergreen broad-leaved forest

ZHANG Jing^{1,2}, SONG Qinghai^{2,*}, ZHANG Yiping², DENY Yun^{2,3}, WU Chuansheng⁴

1 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2 Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China

3 Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies, Menglun 666303, China

4 Anhui Province Key Laboratory of Environmental Hormone and Reproduction, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China

Abstract: Using the Xishuangbanna tropical rain forest and the Ailaoshan subtropical evergreen broad-leaved forest as the research objects, the PWS100 was used to obtain visibility data for the two forest types. Based on the visibility data of the two types of forest, we quantitatively studied the fog characteristics. The results showed that: (1) In 2014, the number of foggy days in the Xishuangbanna tropical rain forest was 196 d, accounting for 53.7% of the whole year. The number of foggy days in the subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailaoshan was 100 d, accounting for 27.4% of the whole year. The number of foggy days in the rain forest was almost twice that of the subtropical evergreen broad-leaved forest; (2) The rainy season and the dry season in the tropical rain forest accounted for 28.06% and 71.94%, respectively. The subtropical

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502105); 国家自然科学基金项目 (41671209; 31600390); 国家自然科学基金与云南省联合项目 (U1602234)

收稿日期: 2018-06-29; 修订日期: 2018-11-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqh@xtbg.ac.cn

evergreen broad-leaved forests accounted for 72% and 28%, respectively. (3) The time of generation and dissipation of fog within the tropical rain forest had certain regularity. Generally, the fog formed at night and dissipated the next morning, the longest time of one day's fog was 10.5 h. The fog generation and dissipation time of subtropical evergreen broad-leaved forest was indefinite, and the maximum duration of fog in one day reached 24 h; however, the frequency of fog was lower than that of Xishuangbanna. There were obvious differences between the two types of forest in the annual fog days. The quantitative assessment of the fog characteristics of the two types of foggy forest ecosystems could provide data in support of future climate change effects on the exchange of carbon and water in different forest ecosystems.

Key Words: fog frequency; fog days; tropical rainforest; subtropical evergreen forest

雾滴沉降是多雾森林生态系统重要的水文和化学输入项^[1-3],在植物叶片、个体和生态系统水平上均起着重要的环境效应,雾的存在甚至对某些森林生态系统类型的分布起着决定性作用^[4-5],有着重要的生态学意义。

雾可以间接缩短日照时间、降低昼间温度^[6],增强生态系统 CO₂及其他养分的供应量^[7]。与一般降雨相比,雾水含有较高的养分浓度和酸度,这种特性极大地影响了植物叶片的生理生态^[7-8]。雾水可以溶解植物体表面的分泌物,并提供枝叶生存所需的离子,使得雾水流经植物叶片后,其化学成分发生了很大变化,并参与到整个生态系统的水分和养分循环中^[9]。在一些亚热带地区,森林植物可从雾水中吸收到一种对其养分循环起非常重要作用的铁离子^[10]。相比短时间的强降雨,缓慢滴落到森林土壤中的雾降水能更好地被植物利用^[1-2]。

国内对雾的研究以城市雾和海雾居多,如前人对南京冬季雾的物理和化学特征^[11]、雾的消生机制^[12]以及海雾的天气特征及物理微观结构^[13]等做出了大量的研究,而对雾与森林生态系统之间的关系研究较少,而且在雾与森林的研究中,对雾日数的计算和雾持续时间的判断大多由人工目测完成,存在较大的主观误差和不确定性。对法属圭亚那热带原始森林^[14]、菲律宾热带雨林^[15]、哥斯达黎加热带森林树种^[16]研究发现,不同热带或亚热带森林树种具有不同的水分特性,表明热带和亚热带森林树种水分利用功能的多样性和复杂性^[15]。因此,探究不同的森林群落的雾特征,可以为全面理解森林的碳水交换过程提供基础数据和科学依据。

云南西双版纳地区是我国大陆热带雨林集中分布的重要区域,同时也是东南亚热带雨林分布的最北缘,该地区气候的一个显著特点是干季(11月—翌年4月)中包含了雾凉季(11月—翌年2月),雾水的输入极大缓解了干季森林内浅层土壤的水分不足^[17-20],为下层浅根植物的生存和生长即森林更新创造了温凉、少变的有利环境^[1-2]。西双版纳森林覆盖率已由20世纪50年代的近70%降至当今的27%,使得本地区雾日数逐年减少,每10年平均以10—27 d的速度在锐减^[21-22]。雾日数的减少势必影响到森林群落的碳固定和水分利用状况。哀牢山地区地处东亚的热带边缘,是云南热带向亚热带发展的过渡地带。哀牢山亚热带常绿阔叶林主要分布在海拔2000 m以上的中山区域,最新研究表明,持久、浓重的雾极大地削弱了森林的蒸发散,使得亚热带常绿阔叶林的5年(2009—2013)平均蒸发散(863 mm/a)和土壤蒸发率均处于较低水平^[23],此外,在全球气候变暖的背景下,可能会导致哀牢山地区水分凝结高度的抬升,从而降低雾发生频率^[24],雾环境的变化将对亚热带常绿阔叶林的生理生态产生影响。因此,雾对西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林起着重要的作用,地处过渡带上的两种森林类型也将更为明显的响应全球变化,有着重要的研究价值。

本研究以西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林为研究对象,利用两地的能见度数据,比较两种森林类型各季节、各月以及每日雾的生成、持续和消散时间的差异,定量评价两类多雾生态系统的雾滴沉降特征,为今后的相关研究提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西双版纳热带雨林 1 hm²永久样地建于 1993 年。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 780 m)。此站点属于国家野外基础观测台站、中国生态系统观测网络(CERN)和中国通量研究网络(ChianFlux)的基础观测站点。西双版纳热带雨林是我国保存最为完整、最典型的热带雨林生态系统,其地处东南亚热带北缘,属西南季风区。由于该地区处于热带北缘,本地区形成了典型的气候特点:季节性干旱和冬季低温。一年中可分为干季(11 月—翌年 4 月)和雨季(5—10 月),其中干季又可分为雾凉季(11 月—翌年 2 月)和干热季(3—4 月)^[25]。年降水量为 1492.9 mm,但是各月份分配不均,最多的 7 月达 316.6 mm,占年降水量的 21.2%;而最少的 1 月仅有 18.6 mm,仅占年降水量的 1.2%。另外,降水集中在雨季(5—10 月),其降水量为 1256.0 mm,占年降水量的 84.1%。年平均相对湿度为 85.0%^[26]。群落高度 35 m 左右,群落盖度 90%,结构复杂,分层现象明显。乔木层按高度即可分为 3 层:上层高 30 m 以上,优势种主要为绒毛番龙眼(*Pometia tomentosa*)、千果榄仁(*Terminalia myriocarpa*);中层高度在 16—30 m 之间,常见种有云南玉蕊(*Barringtonia pendula*)、大叶白颜树(*Gironniera subaequalis*)等;下层高 16 m 以下,主要种包括细罗伞(*Ardisia tenera*)、蚁花(*Mezzettiopsis creaghii*)及滇毒鼠子(*Dichmpetalum gelonioides*)等。灌木层除上层乔木的幼苗幼树外,常见种有染木(*Saprosma ternatum*)、狭叶巴戟(*Morinda angustifolia*)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* spp.)、海芋(*Alocasis macrorrhiza*)、盈江南星(*Arisaema inkiangense*)等。藤本及附生植物丰富,板根及茎花现象显著,是典型的热带雨林,群落年龄在 100 a 以上^[26]。

哀牢山亚热带常绿阔叶林 1 hm²永久样地(24°32'N,101°01'E,2450 m)建于 2003 年 6 月。哀牢山纵贯云南中部,是云岭向南的延伸,其走向为西北—东南走向,位于横断山区南段、云南高原西南部。哀牢山不仅是滇中高原与横断山系南段或滇西纵谷区的地理分界线,同时也是我国冬季东北风和夏季湿热西南季风近直交的地区,具有独特的气候环境。哀牢山与西双版纳地区季节划分相同,11 月—翌年 4 月为干季,降雨较少,气温较低;5 月—10 月为雨季,降水较多,气温较高,呈现了雨热同期的气候特征。一年中干湿季分明,年降雨量 1881.5 mm,其中雨季(5—10 月)为 1607.3 mm(占全年的 85.4%),干季(11—翌年 4 月)为 274.2 mm(仅占全年的 14.6%)。这是由于哀牢山地区全年受著名的西南季风影响以及北半球西风带的南移,使哀牢山形成了干湿季分明的气候。年平均气温 11.0℃,最热月(7 月)平均气温 15.3℃,最冷月(1 月)平均气温 5.1℃。群落盖度为 90%;群落高度 20—25 m;群落优势种有木果柯、硬壳柯、变色锥、南洋木荷;群落分层结构状况:乔木上层,高 20—25 m,主要由木果柯、硬壳柯、变色锥、南洋木荷等组成;乔木亚层,高 5—15 m,主要由黄心树、大花八角(*Illicium macranthum*)、蒙自连蕊茶(*Camellia forrestii*)、斜基叶柃(*Eurya obliquifolia*)等组成;灌木层,高 1—3.5 m,主要以无量山箭竹(*Fargesia wuliangshanensis*)占绝对优势;草本层,高在 0.5 m 以下,由滇西瘤足蕨(*Plagiogyria communis*)、长柱头薹草(*Carex teinogyna*)、钝叶楼梯草(*Elatostema obtusum*)、山酢浆草(*Oxalis griffithii*)等组成;层间藤本和附(寄)生植物丰富。

1.2 数据测定和收集方法

在两地分别安装天气现象仪,对两地的能见度进行实时监测。本研究所采用的天气现象仪为 PWS100(Campbell,美国),多应用与道路、航空和海港等气象的检测,对森林气象的检测应用少。该天气现象仪为全自动工作,适用于无人值守的站点,并且能以符合世界气象组织气象代码标准的格式输出能见度数据,方便进行数据后期处理与进一步利用。天气现象仪 PWS100 测定的能见度量程为 0—20000 m,测定的粒径精度最高为 0.1 mm,光谱响应灵敏度为 850 nm。利用天气现象仪分别收集西双版纳和哀牢山两地 2014 年 1 月 1 日—12 月 31 日的能见度数据,其采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出 1 组平均值,两地全年分别各得到 17522 条数据。

1.3 数据处理

世界气象组织对雾的定义为:能见度小于 1000 m 即表示有雾出现,能见度小于 200 m 表示有浓雾出现。

基于能见度数据统计两地 1 年中出现的雾日总数、各季节和各月出现的雾日数、每天的雾持续时间以及在每月的各个时刻雾持续的时间,并根据所统计出的雾日数及雾日持续时间分别算出在全年、各季节、各月及每天所占的比例(即频率)。

2 结果与分析

2.1 雾发生频率时间变化特征

图 1 为西双版纳热带雨林各月份雾发生频率的日变化(0—24 h)特征,可以看出,10—12 月份,热带雨林雾主要发生在后半夜(0—6 h),而 5—8 月份,在前半夜和后半夜均有雾的发生。10—12 月份雾发生的频率显著高于 5—8 月份。在 1 月份的 5:00 左右,雾发生频率甚至高达 77%(图 1)。3—4 月份雾发生的频率较低。

图 2 为哀牢山亚热带常绿阔叶林各月份雾发生频率的日变化(0—24 h)特征,可以看出,哀牢山亚热带常绿阔叶林全年在不同时刻均有不同程度的雾发生,雾发生的频率低于西双版纳热带雨林,雾发生的最高频率多出现在 10—12 月份,最高约为 30%(图 2)。同样的,在 3—4 月份,下午时段基本没有雾发生(图 2)。

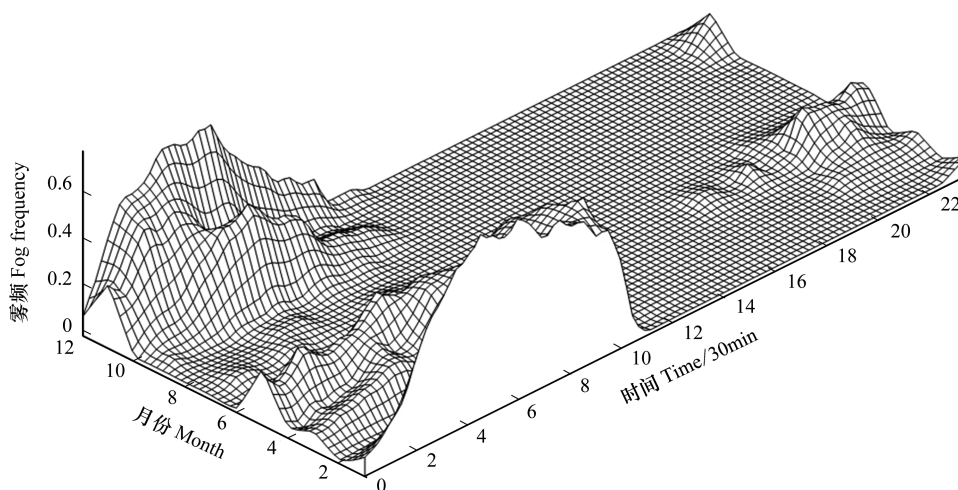


图 1 西双版纳热带雨林雾发生频率时间变化特征

Fig.1 The variation characteristics of fog frequency in the tropical rainforest in Xishuangbanna

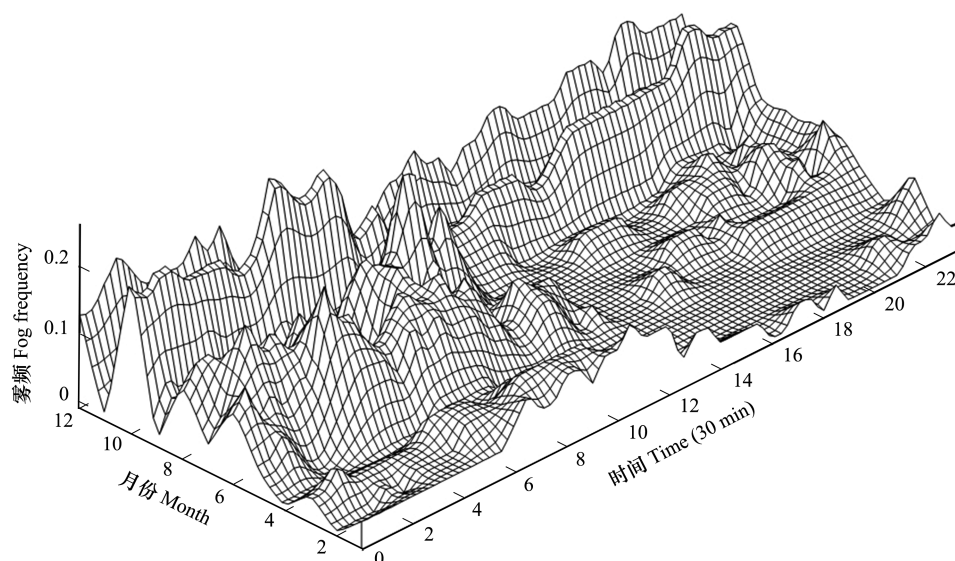


图 2 哀牢山亚热带常绿阔叶林雾发生频率时间变化特征

Fig.2 The variation characteristics of fog frequency in the subtropical evergreen broad-leaved forest in Ailaoshan

2.2 雾日数季节变化

表 1 为西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林森林雾日天数。2014 年,西双版纳热带雨林全年雾日天数为 196 d, 占全年的 53.7%, 浓雾出现天数为 76 d, 占总雾日数的 38.78%; 雾日总持续时间为 726 h。雨季雾日天数为 55 d, 占全年雾日数的 28.06%。干季雾日天数为 141 d, 占全年雾日数的 71.94%, 其中干热季出现雾日天数为 43 d, 占 30.5%, 雾凉季出现雾日天数为 98 d, 占 69.5%。

2014 年, 哀牢山亚热带常绿阔叶林全年雾日数为 100 d, 占全年的 27.4%, 浓雾出现天数为 58 d, 占总雾日数的 58%, 全年出现雾的时间有一半以上均是浓雾; 雾日总持续时间为 446 h; 雨季雾日天数为 72 d, 占全年雾日数的 72%, 干季雾日天数为 28 d, 占全年雾日数的 28%。

两种森林类型各季节雾日天数和雾日频率如表 1 所示, 哀牢山亚热带常绿阔叶林全年雾日数明显少于西双版纳热带雨林, 约为西双版纳热带雨林雾日数的一半, 并且两地出现雾日频率较高的也不在同一季节, 热带雨林雾日天数在干季居多, 而亚热带常绿阔叶林在雨季居多。

表 1 热带雨林与亚热带常绿阔叶林各季节雾日天数(d)和雾日频率/%

参数 Parameters	雨季 Rainy season		干季 Dry season		全年 Whole year	
	热带雨林	亚热带常	热带雨林	亚热带常	热带雨林	亚热带常
	Tropical rainforest	绿阔叶林 Subtropical evergreen broad- leaved forest	Tropical rainforest	绿阔叶林 Subtropical evergreen broad- leaved forest	Tropical rainforest	Subtropical evergreen broad-l eaved forest
雾日天数 Fog days/d	55	72	141	28	196	100
雾日频率 Fog frequency/%	29.9	39.1	77.9	15.5	53.7	27.4

2.3 雾日数和雾发生时长月变化

西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林各月雾日数如图 3 和图 4 所示, 对热带雨林而言, 干季出现雾日数居多, 每月出现的雾日天数均在 20 d 以上, 平均每月出现雾日天数为 23.5 d, 其中干热季平均每月出现雾日天数为 21.5 d, 雾凉季平均每月出现雾日天数为 24.5 d, 1 月份出现雾日天数最多, 为 29 d, 几乎每日有雾, 并且其中有 23 d 均是浓雾, 雨季雾日出现的频率较低, 平均每月出现雾日天数约为 9 d, 其中 6 月、7 月和 8 月三个月每月雾日数不足 5 d, 8 月份雾日天数最少仅有 1 d。

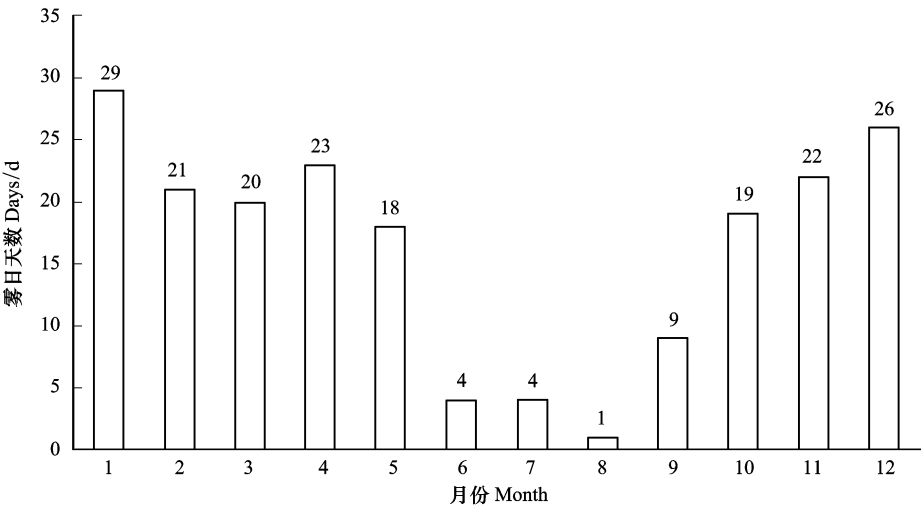


图 3 热带雨林雾日数月变化特征

Fig.3 Monthly variation characteristics of fog days in the tropical rainforest

亚热带常绿阔叶林则与之不同,其雨季雾日天数较多,平均每月出现雾日天数为 12 d(图 4),8 月出现雾日天数最多,为 15 d,雾日数占全年雾日总数的 15%,干季平均每月出现雾日天数仅约为 5 d,每月出现的雾日数基本不足十天,雾日最少天数仅有 1 d,出现在 4 月(图 4)。

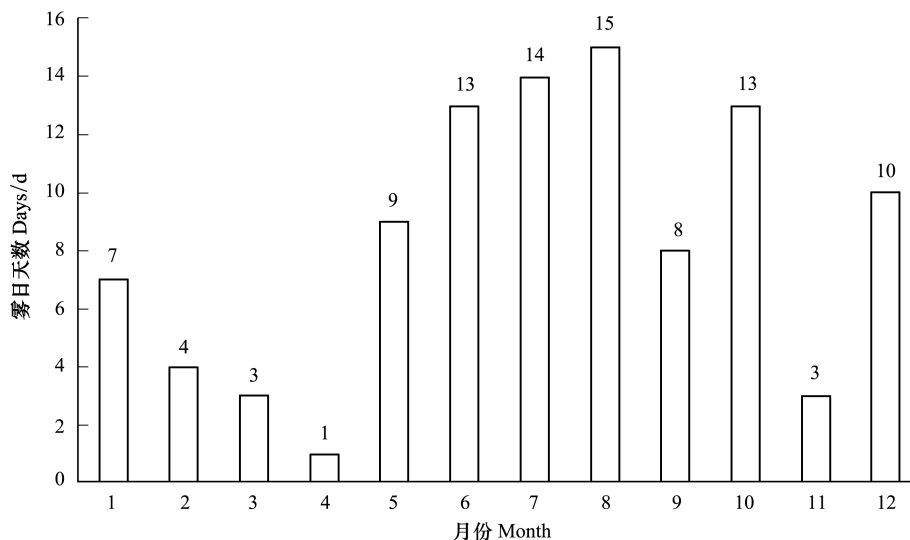


图 4 亚热带常绿阔叶林雾日数月变化

Fig.4 Monthly variation characteristics of fog days in the subtropical evergreen broad-leaved forest

在持续时间上(图 5),热带雨林全年雾日持续时间最长为 10.5 h,在雨季的 6—9 月每天雾持续的最长时间不足 5 h,8 月日最长持续时间仅有 1.5 h。而亚热带常绿阔叶林内雾的日持续时间较长,最长可达 24 h,最短日持续时间出现在 4 月和 11 月,为 2.5 h。此外,亚热带常绿阔叶林内各月雾最长日持续时间几乎均比热带雨林的长。

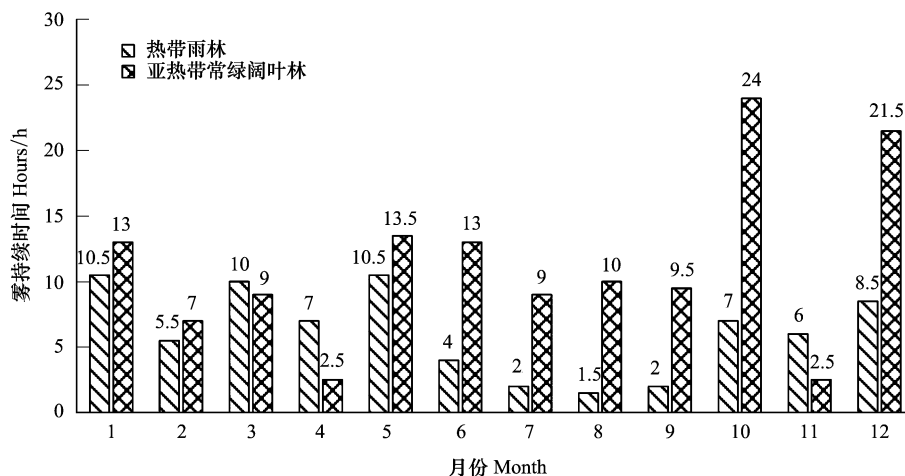


图 5 热带雨林与亚热带常绿阔叶林各月雾日持续最长时间

Fig.5 Maximum duration of monthly fog days in the tropical rain forest and the subtropical evergreen broad-leaved forest

3 讨论

在国内外对雾的研究中,以城市雾和海雾的研究居多,而对森林雾的研究较少。本研究以地处东南亚热带雨林最北缘的西双版纳热带雨林和地处青藏高原南缘的哀牢山亚热带常绿阔叶林为研究对象,探讨两类多雾森林群落雾的特征。对西双版纳热带雨林雾特征的探究,刘文杰等^[1-2]对热带雨林内雾水截留量和雾形成

的小气候特征等进行了相关研究;本文也在前人对哀牢山亚热带常绿阔叶林研究的基础之上,对其雾特征进行了定量研究。

云南西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林生态系统均为山地云雾林。从本研究对热带雨林与亚热带常绿阔叶林两种森林雾的特征定量评价可以看出,两类森林生态系统雾发生的特征有较大差异。10—12 月份,热带雨林雾主要发生在后半夜,而 5—8 月份,在前半夜和后半夜均有雾的发生。10—12 月份雾发生的频率显著高于 5—8 月份。这与刘文杰等^[1-2]对西双版纳热带雨林雾特征研究所得出的结果相一致,雾水极大地弥补了西双版纳热带雨林干季水分不足的状况。而哀牢山亚热带常绿阔叶林全年在不同时刻均有不同程度的雾发生,但雾发生的频率低于西双版纳热带雨林。

热带雨林全年雾日数远高于亚热带常绿阔叶林,其雾日数几乎为亚热带常绿阔叶林雾日数的两倍。热带雨林干季雾日数较多,而亚热带常绿阔叶林雨季雾日数较多,由于雨季降雨丰富,所以太阳辐射量比干季要弱,而且此时又多雾,使得太阳辐射更弱。较弱的太阳辐射有利于哀牢山亚热带常绿阔叶林的发育^[27]。两种森林类型出现的雾日天数的悬殊差别以及雾日出现季节的巨大反差的现象,通过分析主要是两类森林系统所处的海拔差异所致。西双版纳地形主要为海拔 800—1300 m 的低山区,山间盆地和河谷区较哀牢山地区多,热带雨林观测样地海拔 750 m。哀牢山亚热带常绿阔叶林主要分布于海拔在 2200—2600 m 的范围内。悬殊的海拔差异导致两地形成的雾的类型不同,西双版纳热带雨林主要以辐射雾为主,因夜间地面辐射冷却即使贴近地面气层变冷而形成,辐射雾常出现于晴朗、微风、近地面水汽较充沛的夜间或早晨,阴雨天气不利于辐射雾的形成^[28]。这也是西双版纳热带雨林干季雾日较多,雨季雾日较少的原因之一。哀牢山亚热带常绿阔叶林以平流雾为主,由暖空气移到冷下垫面上而形成,范围广而深厚,只要风向、风速适宜,能够持续很久^[29]。所以在亚热带常绿阔叶林中雾可以整日不散,常年云雾缭绕,这与其他亚高山云雾林的特征相似,如台湾的栖兰山亚热带森林^[30]。

本研究团队对哀牢山亚热带常绿阔叶林的固碳能力进行了定量评价,表明哀牢山亚热带常绿阔叶林是一个大碳汇,约 $9\text{ t C hm}^{-2}\text{ a}^{-1}$ ^[31]。本研究表明哀牢山亚热带常绿阔叶林常年都有雾的发生,并且在昼间也有雾的存在(图 2 和图 5)。云雾缭绕的哀牢山亚热带森林生态系统可以间接缩短日照时间、降低昼间温度,增强森林内部的散射辐射,从而增强生态系统 CO_2 及其他养分的供应量^[7],也部分解释了哀牢山亚热带常绿阔叶林是一个大碳汇的原因。此外,之前的研究表明,哀牢山亚热带常绿阔叶林平均蒸发散(863 mm/a)和土壤蒸发率均处于较低水平^[23],这也与哀牢山持久的雾发生特征密切相关。有研究表明,浓雾状况下的西班牙加那利群岛树木蒸腾量仅为晴朗天气条件下的 3%^[32]。本次研究所采用的观测方法为利用 PWS100 天气现象仪进行实时连续观测,打破了人工观测的主观性和不确定性。但本次研究未用到雾滴谱仪来测定雾滴直径大小,还无法准确分辨雾与雾降水。不同的雾滴在多大程度上影响着多雾森林生态系统不同树种个体的水分利用状况,这都有待于下一步对树木个体尺度进行验证。

在全球气候变化日益加剧的今天,全球气候变暖将导致雾线抬升,改变雾环境,从而影响生态系统碳水交换格局。西双版纳热带雨林和哀牢山亚热带常绿阔叶林均生存在多雾生态系统中,雾环境的改变势必影响两种森林的健康持续发展。通过分析 2014 年西双版纳的能见度数据,得到西双版纳热带雨林全年雾日天数为 196 d,与刘文杰等^[2]利用(1999—2002)4 年的雾观测数据对西双版纳雾特征进行研究所得到的雾日数(258 d)有较大差别,表明西双版纳热带雨林的雾日数在逐年减少。这可能与西双版纳原始热带雨林面积减少有密切的联系。但本次研究只采用了 1 年的数据,也可能会对统计数据产生一定的影响。雾日数的减少势必影响到森林群落碳固定和水分利用状况,影响森林群落的碳水循环,进而影响全球气候变化。雾对两种森林群落的水分利用效率和光能利用效率影响及其差异如何,多雾生态系统碳水交换对于对未来雾环境的变化响应程度有何差异,本文未作分析,之后的研究将会进一步探讨。

4 结论

(1) 西双版纳热带雨林雾发生频率高于哀牢山亚热带常绿阔叶林,全年雾日天数约为哀牢山亚热带常绿

阔叶林雾日数的两倍;

(2) 热带雨林和亚热带常绿阔叶林出现雾日较多的季节截然相反,前者干季雾日多,后者雨季雾日多;

(3) 亚热带常绿阔叶林雾可终日持续,最长持续时间在雨季为 24 h,在干季为 21.5 h;热带雨林雾日持续最长时间在干季和雨季均为 10.5 h。

参考文献 (References):

- [1] 刘文杰, 张一平, 刘玉洪, 李红梅, 段文平. 热带季节雨林和人工橡胶林林冠截留雾水的比较研究. 生态学报, 2003, 23(11):2379-2386.
- [2] 刘文杰, 张一平, 李红梅, 段文平. 西双版纳热带季节雨林内雾特征研究. 植物生态学报, 2004, 28(2):264-270.
- [3] Degeffie D T, El-Madany T S, Held M, Hejkal M, Hammer E, Dupont J C, Haefelin M, Fleischer E, Klemm O. Fog chemical composition and its feedback to fog water fluxes, water vapor fluxes, and microphysical evolution of two events near Paris. Atmospheric Research, 2015, 164-165: 328-338.
- [4] Grubb P J, Whitmore T C. A Comparison of Montane and Lowland Rain Forest in Ecuador: II. The Climate and its Effects on the Distribution and Physiognomy of the Forests. Journal of Ecology, 1966, 54(2):303-333.
- [5] Katata G. Fogwater deposition modeling for terrestrial ecosystems: A review of developments and measurements. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(13):8137-8159.
- [6] Hutley L B, Doley D, Yates D J, Boonsaner A. Water Balance of an Australian Subtropical Rainforest at Altitude: the Ecological and Physiological Significance of Intercepted Cloud and Fog. Australian Journal of Botany, 1997, 45(2):311-329.
- [7] Brodrigg T J, Holbrook N M. Stomatal Closure during Leaf Dehydration, Correlation with Other Leaf Physiological Traits. Plant Physiology, 2003, 132(4):2166-2173.
- [8] Eller C B, Lima A L, Oliveira R S. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). New Phytologist, 2013, 199(1):151-162.
- [9] Weathers K C, Lovett G M, Likens G E, Lathrop R. The effect of landscape features on deposition to Hunter Mountain, Catskill Mountains, New York. Ecological Applications, 2000, 10(2):528-540.
- [10] Gindell D I. Irrigation of Plants with Atmospheric Water within the Desert. Nature, 1965, 207(5002):1173-1175.
- [11] 李子华, 刘端阳, 杨军, 濮梅娟. 南京市冬季雾的物理化学特征[J]. 气象学报, 2011(4):706-718.
- [12] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 王巍巍. 南京冬季平流雾的消机制及边界层结构观测分析[J]. 大气科学学报, 2008, 31(4):520-529.
- [13] 徐峰, 王晶, 张羽, 张书文, 陈苗彬. 粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J]. 气象, 2012, 38(8):985-996.
- [14] Granier A, Huc R, Barigah S T. Transpiration of natural rainforest and its dependence on climatic factors. Agric.for.meteorol, 2014, 78(78): 19-29.
- [15] Dierick D, Hölscher D. Species-specific tree water use characteristics in reforestation stands in the Philippines. Agricultural & Forest Meteorology, 2009, 149(8):1317-1326.
- [16] O'Brien J J, Oberbauer S F, Clark D B. Whole tree xylem sap flow responses to multiple environmental variables in a wet tropical forest. Plant Cell & Environment, 2004, 27(5):551-567.
- [17] Liu W, Meng F R, Zhang Y, Zhang Y, Liu Y, Li H. Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, South-West China. Journal of Tropical Ecology, 2004, 20(5):517-524.
- [18] Liu W J, Zhang Y P, Li H M, Liu H M, Liu Y H. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China: a preliminary study. Water Research, 2005a, 39(5):787-794.
- [19] Liu W J, Zhang Y P, Li H M, Liu Y H, Wang C P. Fog- and Rainwater Chemistry in the Tropical Seasonal Rain Forest of Xishuangbanna, Southwest China. Water Air & Soil Pollution, 2005b, 167(1-4):295-309.
- [20] Liu W J, Liu W Y, Li P J, Duan W P, Li H M. Dry season water uptake by two dominant canopy tree species in a tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(3):380-388.
- [21] Zhang K Y. The influence of deforestation of tropical rainforest on local climate and disaster in Xishuangbanna region of China. Climatological Notes, 1986(35):223-236.
- [22] 马友鑫, 郭萍, 张一平, 李佑荣. 西双版纳地区气候变化与森林片断化. 热带植物研究, 1999(46).
- [23] Song Q H, Braeckeveld E, Zhang Y P, Liu Y H, Sha L Q, Zhou W J, Liu Y T, Wu C S, Lu Z Y, Otto K. Evapotranspiration from a primary subtropical evergreen forest in SW China. Ecohydrology, 2017. DOI: 10.1002/eco.1826
- [24] Nair U S, Welch R M, Lawton R O, Pielke R A. Impact of land use on Costa Rican regional climate[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. IEEE, 2000:1993-1995 vol.5.

- [25] 吴征镒. 中国植被. 北京:科学出版社, 1980. 363-397.
- [26] Cao M, Zou XM, Warren M, Zhu H. Tropical forests of Xishuangbanna, China. *Biotropica*, 2006, 38(3): 306-309.
- [27] 郎政伟, 巩合德. 气候因子对哀牢山常绿阔叶林的限制作用研究. *绿色科技*, 2013(4): 3-5.
- [28] 刘文杰, 李红梅. 我国西双版纳雾资源及其评价. *自然资源学报*, 1996, 11(3): 263-267.
- [29] 伍光 and, 王乃昂, 胡双熙, 田连恕, 张建明. *自然地理学*. 高等教育出版社, 2011, 107-108.
- [30] Mildenerger K, Beiderwieden E, Hsia YJ, Klemm O. CO₂ and water vapor fluxes above a subtropical mountain cloud forest—The effect of light conditions and fog. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(10): 1730-1736.
- [31] Tan Z H, Zhang Y P, Schaefer D A, Yu G R, Liang N S, Song Q H. An old-growth Asian subtropical evergreen forest as a large carbon sink, *Atmospheric Environment*. 2011, 45: 1548-1554
- [32] Axel R, Carlos M R, Guido A. Fog reduces transpiration in tree species of the Canarian relict heath-laurel cloud forest (Garajonay National Park, Spain). *Tree Physiology*, 2009, 29(4): 517-528.