

云南不同森林生态系统蒸散特征的比较研究

林友兴^{1,6}, 张一平^{1,2**}, 费学海^{1,6}, 宋青海¹, 许 琨⁵, 邓 云³, 刘维隳⁵,
陈爱国⁴, 李培广⁴, 黄 华⁵, 金艳强^{1,6}, 李 敬^{1,6}

(1. 中国科学院 热带森林生态学重点实验室(西双版纳热带植物园), 云南 勐仑 666303; 2. 中国科学院 哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 云南 景东 676209; 3. 中国科学院 西双版纳热带雨林生态系统研究站, 云南 勐仑 666303; 4. 中国科学院 西双版纳热带植物园 元江干热河谷生态站, 云南 元江 653300; 5. 中国科学院 昆明植物研究所 丽江森林生态系统定位研究站, 云南 丽江 674100; 6. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:应用涡度相关技术,对云南5种主要森林生态系统的水汽通量连续多年观测,利用2003—2015年观测数据探讨了不同森林生态系统的蒸散特征和变化规律,并分析了蒸散量与土壤含水量和降水量的关系。结果表明:①不同森林蒸散的日变化均表现为单峰曲线,但蒸散启动和结束时间以及峰值出现的时间有所差异;②不同森林蒸散量的年变化表现为单峰曲线,最大值在7月,最小值在1月,雨季蒸散大于干季蒸散;③多年平均年蒸散量为热带雨林795.68 mm、橡胶林774.54 mm、稀树灌草丛435.35 mm、亚热带常绿阔叶林767.69 mm和亚高山针叶林438.83 mm,分别占各生态系统年降水量的55.05%、59.77%、56.58%、52.80%和42.17%,显示云南主要森林生态系统均为水分盈余状态;④不同森林的蒸散量与土壤含水量的关系不尽相同,说明不同森林生态系统对水分的利用策略存在不同。研究结果可为评价森林生态系统的生态水文效应和水分利用策略及理解其对气候变化的响应提供科学基础。

关键词: 森林生态系统; 涡度相关; 蒸散; 水分利用策略; 云南

中图分类号: Q 148 **文献标志码:** A **文章编号:** 0258-7971(2019)01-0205-14

森林水汽通量(蒸散, evapotranspiration)是森林与大气间水、热交换的重要方式之一,它包括森林土壤和植被表面的蒸发(evaporation)和植被的蒸腾(transpiration)两个过程。蒸散不仅受植物生长状态、生理特征的影响,也受气象、地形和土壤等环境因素的影响,在时间和空间上均存在一定的变异性^[1-2],它同时又与植物的生理活动及生物产量的形成密切相关^[3]。

森林蒸散不仅是森林热量平衡与水分循环中的一项重要分量^[4-5],也是反映植被水分状况的重要指标^[6-7],同时又是影响区域和全球气候的重要因素^[8-9]。有研究认为最近几十年全球陆地蒸散呈现减小的趋势^[10-11],但也有得出相反的结论^[12],对陆地生态系统蒸散的变化趋势及其原因仍不清楚。因此,对森林生态系统蒸散的准确估算及其组分的研究,对正确认识森林生态系统水文功能、深入

理解生物和非生物因子对蒸散过程的控制作用、探究全球水循环规律具有重要意义^[13]。

目前基于多站点生态系统蒸散的比较研究还比较少,难以把握不同生态系统之间的蒸散和水分利用特征及其差异。因此,本研究选取了云南5种主要森林生态系统类型:热带雨林、橡胶林、稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林生态系统,利用开路涡度相关技术测定得到的水汽通量连续观测数据,比较分析云南5种森林生态系统的蒸散特征及其变化规律,以了解云南不同森林生态系统的水分利用特征,为森林生态系统的生态水文过程对气候变化的响应研究提供支持。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况 云南省位于中国西南的边陲,北回归线从该省南部横穿而过,地势北高南低,南

收稿日期:2017-10-07; 接受日期:2017-12-05; 网络出版日期:2019-01-10

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0502105);国家自然科学基金项目(U1602234, 41671209)。

作者简介:林友兴(1989-),男,福建人,博士生,主要从事森林碳水耦合方面的研究。E-mail: linyouxi@xtbg.ac.cn.

** 通信作者:张一平(1957-),男,云南人,博士,研究员/教授,主要从事全球变化方面的研究。E-mail: yipingzh@xtbg.ac.cn.

北之间高差达 6 663.6 m; 受西南季风影响, 一年中有雨(湿)季(5~10 月)和干季(11 月~翌年 4 月)之分, 干湿季节的变化在植物的物候及生理上有明显反应, 植物在干热季时有落叶和换叶现象^[14-15]. 受地形和天气系统的影响, 云南的气候区域差异和垂直变化明显, 使其拥有北热带、南亚热带、中亚热带、北亚热带、暖温带、中温带和高原气候区等 7 个温度带气候类型, 生态系统复杂, 是研究不同生态系统生态效应的良好场所. 本研究利用中国科学院设置在云南的 4 个生态系统研究站(图 1 和表 1): 西双版纳热带雨林生态系统研究站(以下简称西双版纳站, 包括热带雨林和橡胶林)、元江干热河谷生态站(以下简称元江站)、哀牢山亚热带森林生态系统研究站(以下简称哀牢山站)、丽江森林生态系统定位研究站(以下简称丽江站), 选取了 5 种森林生态系统, 使用开路涡度相关系统进行长期连续监测, 本研究利用所获取的森林蒸散数据开展比较研究.

西双版纳热带雨林生态系统通量观测塔属于中国通量研究网络(ChinaFlux)的观测站点, 终年受西南季风控制, 属热带季风气候; 西双版纳橡胶林生态系统通量观测塔位于中国科学院西双版纳热带植物园经济推广站所属橡胶林(1982 年定植)内, 也属热带季风气候; 元江稀树灌草丛生态系统通量观测塔设立在元江站建立的 1 hm² 永久样地

旁, 每年 35℃ 以上的高温天气超过 100 天^[16], 干旱指数约为 0.3, 属于典型的半干旱区^[17]; 哀牢山常绿阔叶林生态系统通量观测塔设立在哀牢山站附近, 属于中国通量研究网络(ChinaFlux)的观测站点, 气候垂直分布明显, 属于山地气候; 丽江亚高山针叶林生态系统通量观测塔是依托丽江站设立在云南玉龙雪山自然保护区内的云杉坪 25 hm² 的大样地内, 气候垂直差异很大, 属于北温带气候. 各站点概况详见表 1.

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 本研究的数据主要来源于中国科学院在云南设立的 4 个野外观测台站——西双版纳站(包括热带雨林和橡胶林)、元江站、哀牢山站和丽江站的通量观测系统与常规气象梯度观测系统: H₂O 开路红外气体分析仪和三维超声风速仪; 在塔顶设置有雨量筒, 在地下安装有多层土壤湿度传感器收集土壤含水量等数据. 4 个台站 5 种生态系统观测点仪器配置见表 2.

1.2.2 数据的获取 开路涡度相关系统(open-path eddy covariance, OPEC)所观测的数据和降水量、土壤含水量数据都是通过数据采集器 Datalogger (CR5000/CR10X/CR23X-TD+AM25T, Campbell Sci., USA)以 10 Hz 的频率自动采集并输出到计算机存储. 为了保证数据可比性和准确性, 对仪器设备进行了定期的校对和维护.

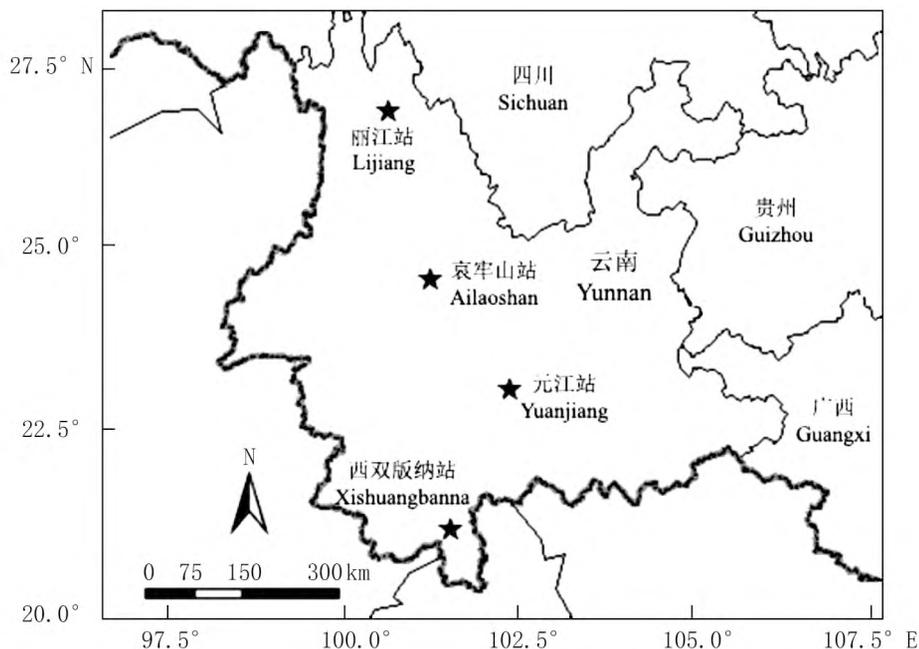


图 1 云南 4 个生态系统研究站的地理位置
Fig. 1 Four ecosystems research stations in Yunnan

表 1 云南 4 个研究站点的概况
Tab. 1 Overview of four research stations in Yunnan province

站点概况	热带雨林 (西双版纳站)	橡胶林 (西双版纳站)	稀树灌草丛 (元江站)	亚热带常绿阔叶林 (哀牢山站)	亚高山针叶林 (丽江站)
地理位置	21°55' N, 101°16' E	21°54' N, 101°16' E	23°28' N, 102°10' E	24°32' N, 101°01' E	27°08' N, 100°13' E
海拔高度/m	780	592	553	2 467	3 240
多年平均温度/°C	21.4	21.4	23.8	11.3	5.5
多年平均年降水量/mm	1 490	1 490	784.9	1 947	910~1 040
雨季土壤含水量/%	28~40	28~40	10~20	32~45	27~40
干季土壤含水量/%	17~25	17~25	6~11	20~30	25~31
土壤类型	砖红壤	砖红壤	燥红土	黄棕壤	暗棕壤
植被类型	热带雨林	橡胶林	稀树灌草丛	亚热带常绿阔叶林	亚高山针叶林
乔木层优势种	千果榄仁 (<i>Terminalia myriocarpa</i>) [18]	橡胶树 (<i>Hevea brasiliensis</i>) [19]	厚皮树 (<i>Lannea coromandelica</i>) [20]	木果柯 (<i>Lithocarpus xylocarpus</i>) [21]	丽江云杉 (<i>Picea likiangensis</i>) [22]
平均林冠层高度/m	35.0	21.0	4~6	25~30	40.0

表 2 云南 4 个研究站点观测仪器配置情况
Tab. 2 Observation instruments of four research stations in Yunnan

仪器情况	热带雨林 (西双版纳站)	橡胶林 (西双版纳站)	稀树灌草丛 (元江站)	亚热带常绿阔叶林 (哀牢山站)	亚高山寒温带性针叶林 (丽江站)
H ₂ O分析仪厂商	Li-7500, Li-Cor., USA	Li-7500A, Li-Cor., USA	Li-7500A, Li-Cor., USA	Li-7500, Li-Cor., USA	EC150, Campbell Sci., USA
H ₂ O分析仪安装高度/m	48.80	38.00	13.80	34.00	60.00
三维超声风速仪厂商	CSAT3, Campbell Sci., USA	CSAT3, Campbell Sci., USA	WindMaster_1590, Gill Instruments, UK	CSAT3, Campbell Sci., USA	CSAT3 (A), Campbell Sci., USA
三维超声风速仪安装高度/m	48.80	38.00	13.80	34.00	60.00
雨量传感器厂商	RainGauge 52203, Young, USA	TE525MM, Texas Electronics, USA	RainGauge 52203, Young, USA	RainGauge 52203, Young, USA	TE525MM, Texas Electronics, USA
雨量传感器安装高度/m	72.00	56.90	13.80	31.00	60.15
土壤湿度传感器厂商	CS616, Campbell Sci., USA	CS616, Campbell Sci., USA	CS616, Campbell Sci., USA	CS616, Campbell Sci., USA	Hydra Probe II, Stevens Inc., USA
土壤湿度传感器安装层数	3	3	2	6	5
投入使用时间	2002	2008	2013	2008	2014

1.2.3 数据的处理 数据处理时,先将 10 Hz 的原始数据转换为时间步长为 30 min 的均值数据;然后采用通量界公认的数据处理方法——通量数据的质量保证/质量控制 (quality assurance/quality control, QA/QC) 来对数据进行质量控制和处理;最后再根据涡度相关技术的原理^[23-24]直接计算垂直风速与水汽浓度之间脉动的协方差,得到水汽通量(F_{H_2O})。同时,通过设立在观测铁塔上的常规气象梯度观测系统获取降水量和土壤含水量数据。

生态系统蒸散 (evapotranspiration, ET) 的计算公式为:

$$ET = F_{H_2O} = \overline{w'\rho'}, \quad (1)$$

式中, ET 或者 F_{H_2O} 为生态系统的蒸散量/水汽通量 ($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), w 为涡度相关系统所测得的垂直风速 ($m \cdot s^{-1}$), ρ 为涡度相关系统所测得的水汽浓度 ($g \cdot m^{-3}$), 上撇 (') 表示脉动 (脉动量), $\overline{w'\rho'}$ 为垂直风速 (w) 和水汽浓度 (ρ) 之间的协方差。

将各生态系统的多年蒸散数据按季节整理, 然后逐一对每日 0:00—23:00 对应的 48 个 30 min 蒸散量进行平均, 得到不同季节下生态系统的蒸散日变化, 其计算公式为:

$$\overline{ET_{dd_i}} = \sum_{j=1}^{j=n} (ET_{ij} \times 1800/1000)/n, \quad (2)$$

式中, $\overline{ET_{dd_i}}$ 为生态系统蒸散日变化内的第 i 个 30 min 的平均蒸散量 (mm); ET_{ij} 为一个季节开始 ($j=1$) 到结束 ($j=n$) 时, 季节内生态系统蒸散日变化的第 i 个 30 min 的蒸散总量 (mm); n 为该季节的天数 (d)。

生态系统日蒸散量的计算公式为:

$$ET_d = \sum_{i=1}^{i=48} (ET_i \times 1800/1000), \quad (3)$$

式中, ET_d 为生态系统的日蒸散量 (mm); ET_i 为每天第 i 个 30 min 内的平均蒸散量 (mm)。

那么, 一段时间内生态系统的蒸散量的计算公式为:

$$ET_p = \sum_{j=m}^{j=n} ET_d, \quad (4)$$

式中, ET_p 为从一年的第 m 天到第 n 天这一时期内生态系统的蒸散总量 (mm), 由此公式可以计算生态系统的月、季节和年的总蒸散; ET_d 为生态系统的日蒸散量 (mm)。

1.3 数据分析 各站点的观测期间为 2003—2015 年; 土壤含水量选用 2 个层次: 表层土壤含水量 (5 cm) 和深层土壤含水量 (热带雨林 40 cm、橡胶林 100 cm、稀树灌草丛 40 cm、亚热带常绿阔叶林 60 cm、亚高山针叶林 40 cm)。利用 SPSS 16.0 对数据进行统计分析, 使用 Microsoft Excel 2016、Adobe Photoshop CC 作图。

2 结果与分析

2.1 各森林生态系统的降水量和土壤含水量变化特征 从图 2 可看出, 云南 5 种森林生态系统降水量的年变化均表现为单峰曲线, 雨季降水量明显大于干季, 表明各森林生态系统降水的季节差异明显。年降水量为热带雨林 1 445.5 mm、橡胶林 1 295.9 mm、稀树灌草丛 842.2 mm、亚热带常绿阔叶林 1 454.1 mm 和亚高山针叶林 1 045.5 mm。各生态系统的最大月降水量均出现在 2 月, 但最大月降水量出现的月份有差异。各生态系统的土壤含水量年变化特征同降水量趋势基本相似, 也呈单峰曲线 (图 2)。各生态系统的土壤含水量的最大值出现在 7—9 月, 与降水量峰值出现月份基本相似, 但有些生态系统稍有推迟, 如橡胶林和亚热带常绿阔叶林生态系统 (图 2b 和 2d); 土壤含水量最小值出现在干季末期。此外, 由图 2a、2c 和 2d 可看出, 在干季末期已出现降水的生态系统, 如热带雨林、稀树灌草丛和亚热带常绿阔叶林, 表层土壤含水量已在逐渐增加, 但较深层的土壤含水量还处于下降或趋于平缓的态势。

2.2 各森林生态系统的蒸散量变化特征

2.2.1 蒸散量日变化特征 从图 3 可得, 各生态系统的蒸散日变化均为单峰曲线, 蒸散量基本上为正值; 各生态系统蒸散启动和结束时间 (以下时间均为地方时) 存在一定差异, 但基本上开始于 7:15 左右, 结束于 18:15 左右。在夜间, 各生态系统的蒸散基本上都维持在很低水平。在雨季, 各个生态系统的最大蒸散量基本上出现在 13:45 左右, 干季则出现在 13:15 左右, 即各生态系统蒸散在一天中最炎热时刻达到最大, 其后蒸散急剧下降, 特别是处于热带地区的热带雨林和橡胶林降速更明显 (图 3a、3b、3f 和 3g)。

从图 3 还可看出, 各生态系统的日蒸散量均是雨季大于干季。热带雨林和橡胶林蒸散的日变化曲线峰型在干季具有“尖而矮”的特征 (图 3f 和 3g),

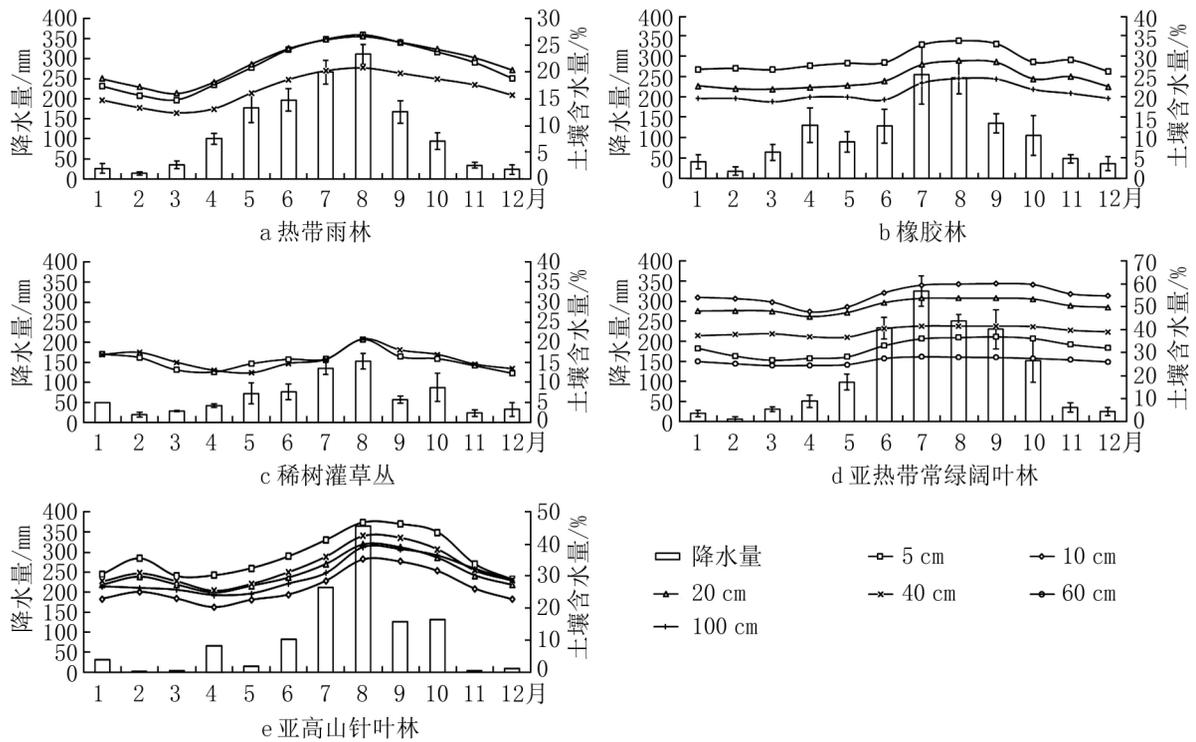


图 2 云南不同森林生态系统降水量和土壤含水量的年变化

Fig. 2 Annual variations of precipitation and soil water content of five forest ecosystems in Yunnan. a, tropical rainforest; b, rubber plantation; c, savanna; d, subtropical evergreen broad-leaved forest; e, subalpine coniferous forest.

而其在雨季则呈相对“宽而高”(图 3a 和 3b);从季节上看,位于热带地区的热带雨林(图 3a)和橡胶林(图 3b)蒸散日变化的峰型面积(日蒸散量)较位于纬度较高的稀树灌草丛(图 3c)、亚热带常绿阔叶林(图 3d)和亚高山针叶林(图 3e)大。

在雨季,与稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林相比,热带雨林和橡胶林的日蒸散曲线峰值大且持续时间长(图 3a 和 3b),说明热带地区的热带雨林和橡胶林的日蒸散明显大于纬度较高的生态系统。对同处热带地区的热带雨林和橡胶林而言,热带雨林的日蒸散曲线峰值较橡胶林高,但持续时间不及橡胶林长(图 3a 和 3b、3f 和 3g)。此外,与其它生态系统相比,亚热带常绿阔叶林的夜间蒸散在雨季维持较高水平(图 3d);热带雨林和橡胶林的日蒸散曲线峰值在干季较大,但持续时间短(图 3f 和 3g),其日蒸散与其它生态系统差异不明显,甚至小于亚热带常绿阔叶林(图 3i)。

2.2.2 蒸散量的年变化特征 如图 4 所示,除橡胶林外,各森林生态系统蒸散量的年变化趋势基本呈单峰曲线。各森林生态系统的日蒸散年变化间存在一定差异,如热带雨林(图 4a)、橡胶林(图 4b)和亚热带常绿阔叶林(图 4d)的日蒸散年变化波动幅

度较小,而稀树灌草丛(图 4c)和亚高山针叶林(图 4e)生态系统的日蒸散的年变化波动幅度则较大。在雨季,热带雨林、稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林的蒸散量波动比较明显,如热带雨林的蒸散在 7、8 月波动尤为明显(图 4a),而稀树灌草丛在降水量峰值出现的 7 月波动非常明显(图 4c)。此外,对稀树灌草而言,其蒸散在雨季(生长季)波动较大,且明显大于干季(非生长季),而干季维持着非常低的蒸散水平(图 4c)。

从图 4 还可看出,橡胶林的蒸散量年变化存在 2 个峰值,分别在 1 月下旬和 8 月。在干季,橡胶林生态系统的蒸散量在 1 月下旬出现第 1 个峰值后开始逐渐减少,直到 2 月中旬达到最小值,而后又逐渐上升,这种变化规律与橡胶林在 2 月初集中换叶有关(图 5)。

从图 6 可见,各生态系统蒸散量的年变化呈单峰曲线特征,虽然各生态系统蒸散量的最大值和最小值出现月份不尽相同,但最大值均出现在雨季(湿季),最小值出现在干季。热带雨林、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林在 7 月的蒸散量最大,分别为 89.22、88.65 mm 和 50.66 mm;橡胶林、稀树灌草丛在 8 月蒸散量最大,分别为 79.79 mm 和

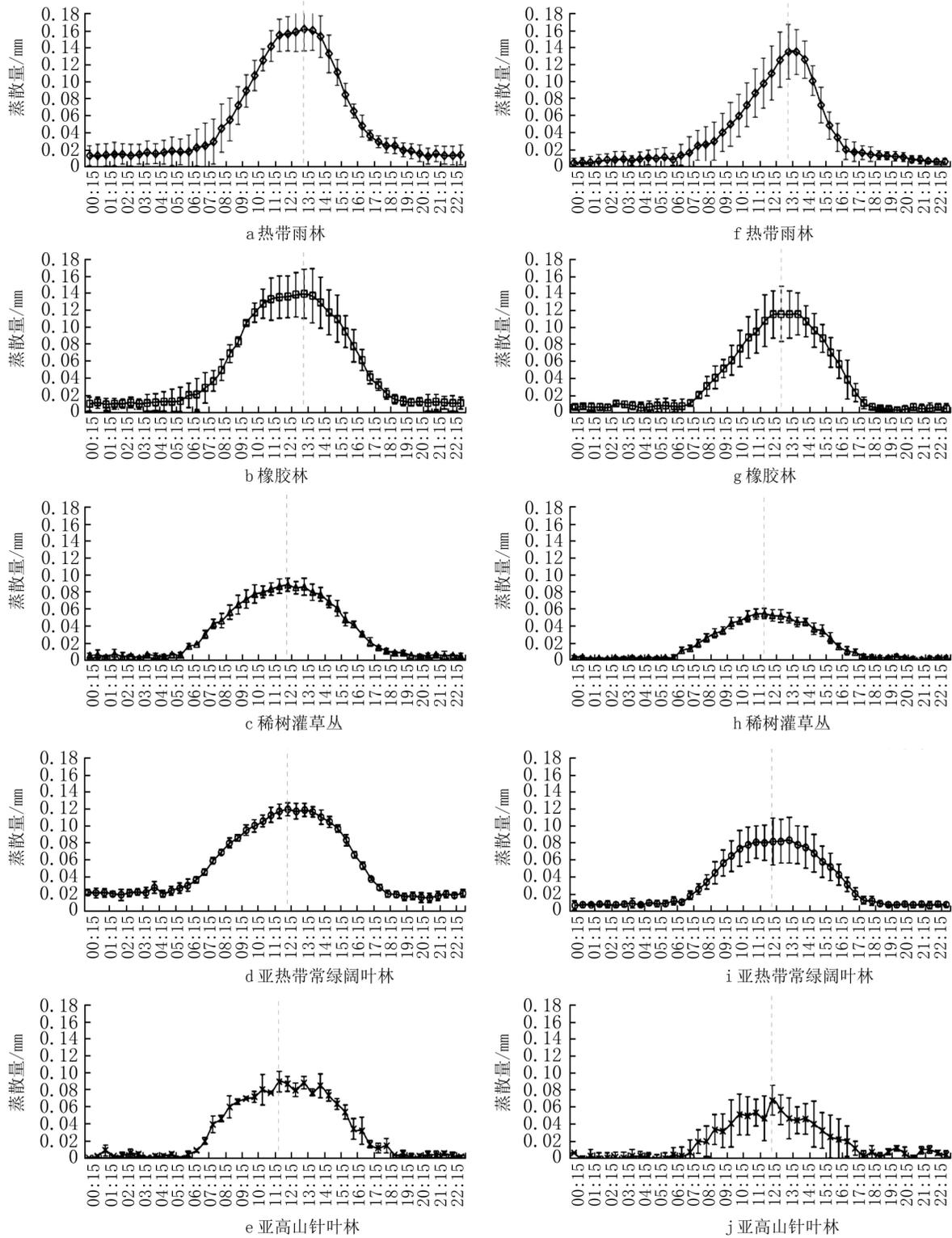


图 3 云南不同森林生态系统雨季和干季的平均蒸散的日变化。其中左侧为雨季,右侧为干季。

Fig. 3 Diurnal variations of evapotranspiration during different seasons over five forest ecosystems in Yunnan. a & f, tropical rainforest; b & g, rubber plantation; c & h, savanna; d & i, subtropical evergreen broad-leaved forest; e & j, subalpine coniferous forest. The left panel a, b, c, d, e are daily evapotranspiration during the rainy season, and the other panel f, g, h, i, j are daily evapotranspiration during the dry season.

66.22 mm; 热带雨林、稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林的蒸散量最小值出现在 12 月 ~

翌年 1 月,依次为 44.04、20.86、42.00 mm 和 10.40 mm。从图 6b 还可看出,橡胶林月蒸散量的年变化在

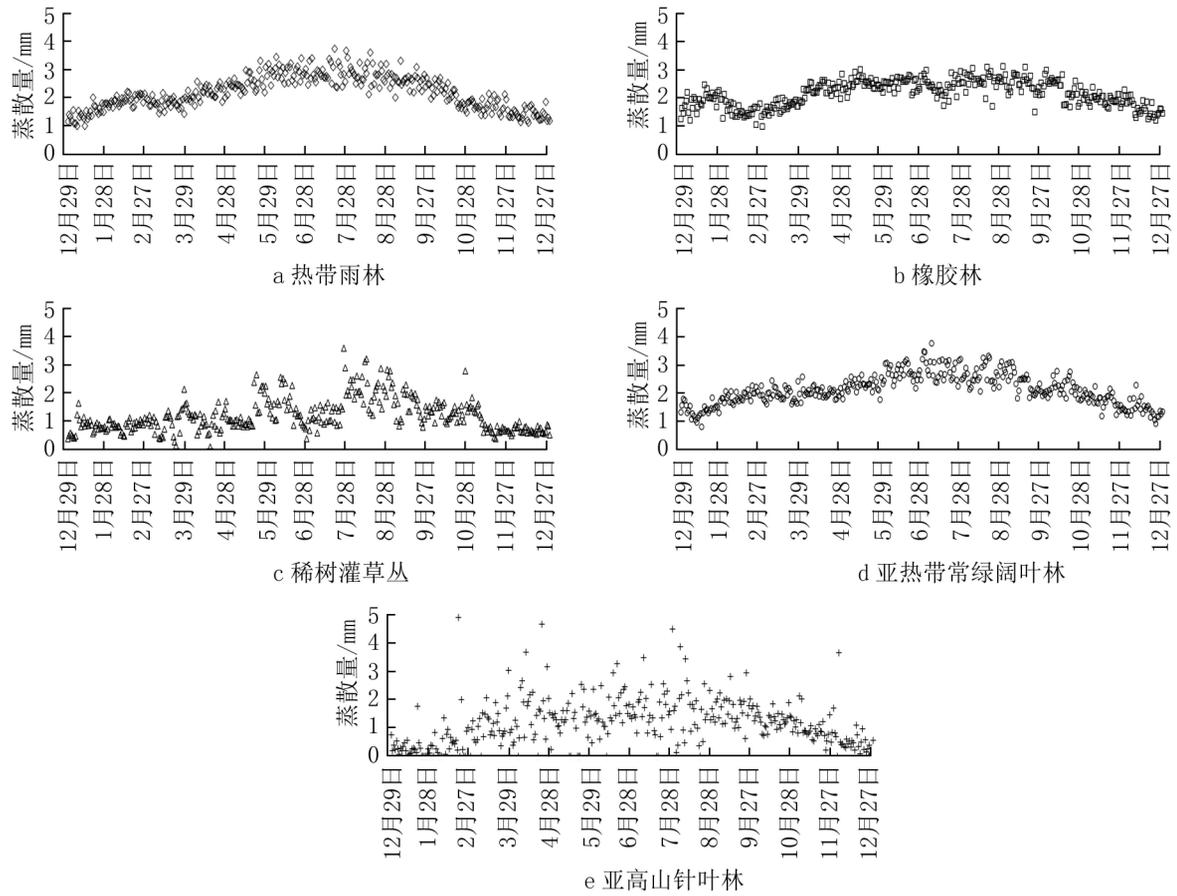


图 4 云南不同森林生态系统日蒸散量的年变化。

Fig. 4 Annual variations of daily evapotranspiration over five forest ecosystems in Yunnan. a, tropical rainforest; b, rubber plantation; c, savanna; d, subtropical evergreen broad-leaved forest; e, subalpine coniferous forest.

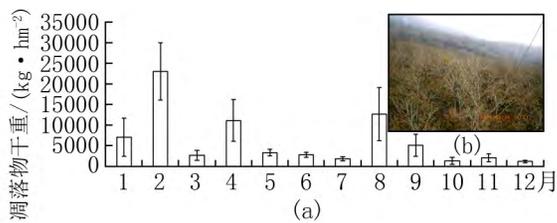


图 5 西双版纳橡胶林凋落物年变化。

Fig. 5 Annual variations of litterfall of rubber plantations in Xishuangbanna.

2月出现最小值, 为 42.53 mm, 显示了在 2 月集中换叶(图 5)对橡胶林蒸散的影响。

从图 7 可看出, 热带雨林、橡胶林、稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林的季节蒸散都表现为雨季明显大于干季, 其中雨季蒸散量依次为 481.62、449.00、282.51、458.27mm 和 274.05mm, 依次占同期各生态系统降水量的 39.69%、46.75%、48.90%、35.61% 和 29.48%; 干季的蒸散量分别为 314.06、325.54、152.84、309.42 mm 和 164.78 mm,

其中橡胶林和稀树灌草丛的水分略有盈余, 而热带雨林、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林的水分亏损严重, 蒸散量分别是降水量的 1.35、1.85 和 1.49 倍。显然, 热带雨林、橡胶林和亚热带常绿阔叶林的季节蒸散差异不明显, 稀树灌草丛和亚高山针叶林的也不明显, 但热带雨林、橡胶林和亚热带常绿阔叶林的季节蒸散是稀树灌草丛和亚高山针叶林的 1.5 倍左右。

各森林生态系统的年蒸散量为: 热带雨林 795.68 mm、橡胶林 774.54 mm、稀树灌草丛 435.35 mm、亚热带常绿阔叶林 767.69 mm 和亚高山针叶林 438.83 mm, 依次占各自降水量的 55.05%、59.77%、56.58%、52.80% 和 42.17%。

2.3 各生态系统蒸散量与降水量、土壤含水量的关系 从图 8 可看出, 各生态系统的蒸散量与降水量的曲线拟合均为开口向下的抛物线关系, 表现出森林蒸散随降水量的增加先增加再减小的趋势。由图 8a、8d、8g、8j 和 8m 可以得到, 热带雨林、橡胶

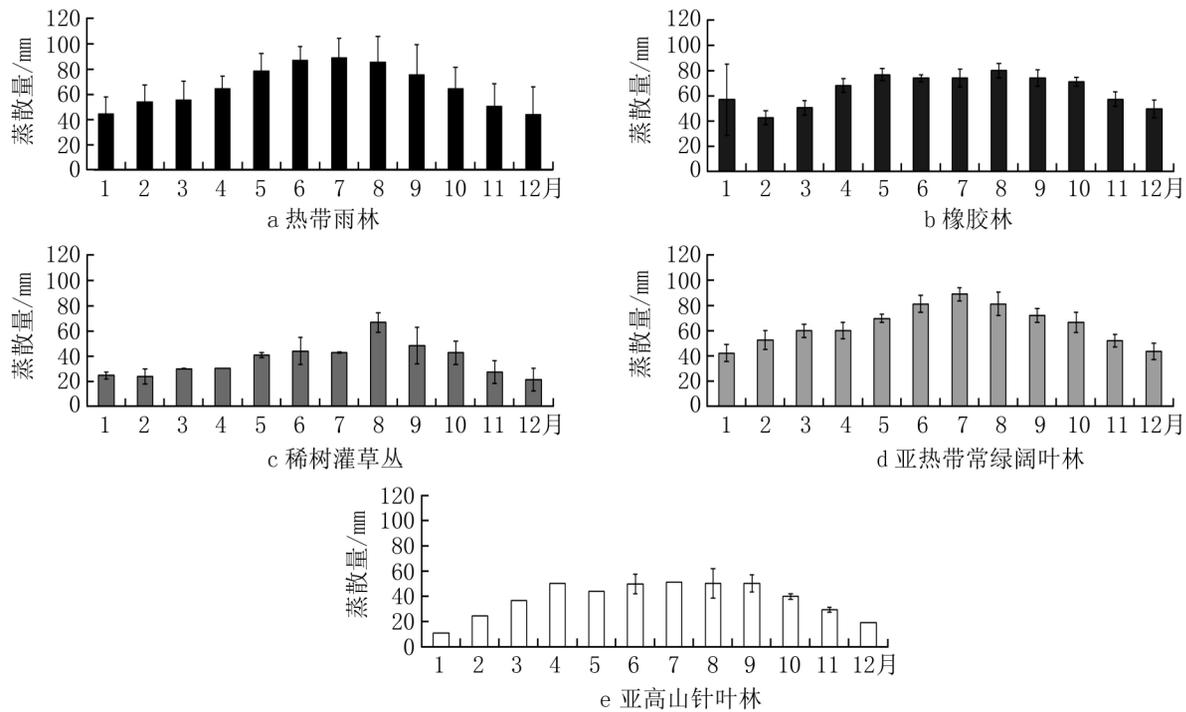


图 6 云南不同森林生态系统月蒸散量的年变化

Fig. 6 Annual variations of monthly evapotranspiration over five forest ecosystems in Yunnan. a, tropical rainforest; b, rubber plantation; c, savanna; d, subtropical evergreen broad-leaved forest; e, subalpine coniferous forest.

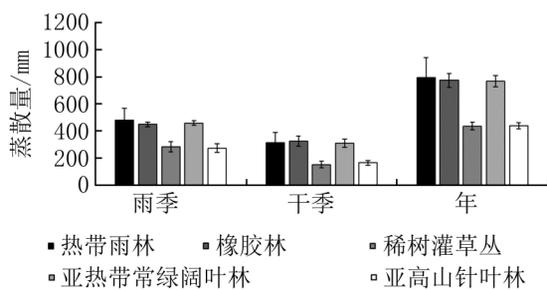


图 7 云南不同森林生态系统蒸散量的季节和年总量
Fig. 7 Seasonal and annual amounts of evapotranspiration over five forest ecosystems in Yunnan

林、稀树灌草丛、亚热带常绿阔叶林和亚高山针叶林的月降水量对其月蒸散量产生抑制的阈值分别为 297.50、346、270.92、277.63 mm 和 293.83 mm, 其曲线拟合的 R^2 依次为 0.35 ($P < 0.001$)、0.26 ($P < 0.001$)、0.58 ($P < 0.001$)、0.63 ($P < 0.001$) 和 0.63 ($P = 0.019$)。

从图 8 可看出,在土壤含水量的一定范围内,稀树灌草丛(图 8h 和 8i)和亚高山针叶林(图 8n 和 8o)的月蒸散量随土壤含水量增加而增加,这 2 个生态系统蒸散与表层、深层土壤含水量曲线拟合的 R^2 依次为 0.49 ($P < 0.001$)、0.29 ($P = 0.007$) 和 0.52 ($P = 0.006$)、0.19 ($P = 0.23$)。土壤含水量对生态系统蒸散的影响同样存在阈值,求算的这 2 个生态系统

蒸散受表层土壤含水量抑制的阈值分别为 29.96% 和 41.99%。

从图 8h 和 8i 还可以看出,稀树灌草丛的蒸散与土壤含水量的关系基本上是线性的,而热带雨林(图 8b 和 8c)、橡胶林(图 8e 和 8f)和亚热带常绿阔叶林(图 8k 和 8l)的蒸散随土壤含水量增加均表现出先稍有减小再增加的规律。

3 讨论

3.1 云南不同森林生态系统蒸散量的变化 本研究表明,云南不同森林生态系统蒸散的日变化均表现为单峰曲线(图 3),显示了森林生态系统较强的水汽输送能力;雨季蒸散量日变化曲线较干季更为平滑、宽峰,说明森林蒸散受环境因子的日变化影响较小,有较长时间能维持在高水平蒸散。雨季较干季日蒸散量大,这与张晓娟等^[25]对海南岛橡胶林的研究结果一致,也与李志恒^[26]和牛晓栋等^[27]的研究结果相似。不同森林蒸散量的日变化与单个树种的液流密度、蒸腾速率和蒸腾量的日变化相似^[28-30],这是因随着日出,地表温度逐渐增加,植物光合作用不断增强,地表蒸发和植被蒸腾也逐渐增强,但植被蒸腾作用增加的程度要大于地表蒸发的幅度,因而生态系统蒸散更多表现出与植

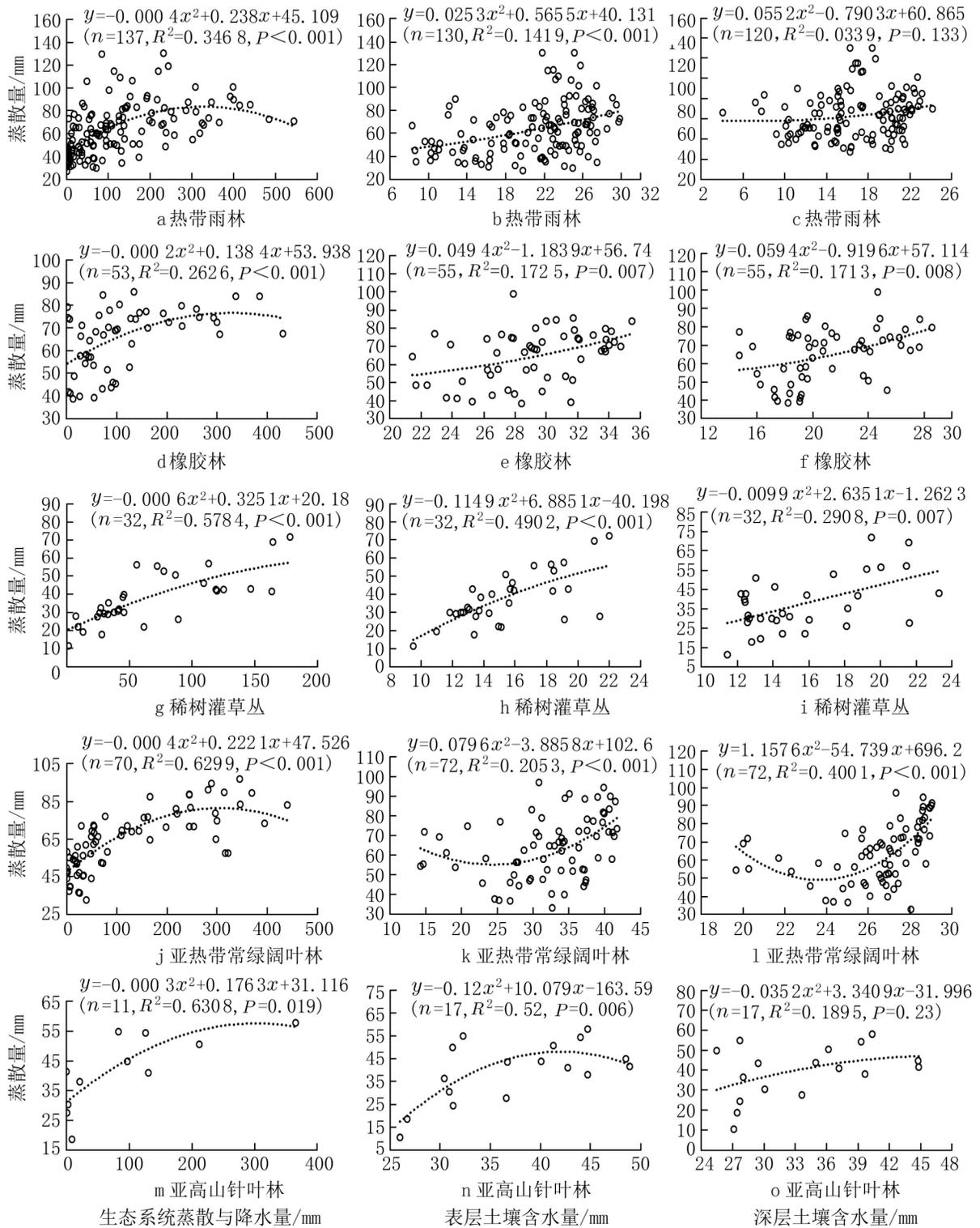


图 8 云南不同森林生态系统月蒸散量与降水量、表层和深层土壤含水量的拟合关系. 左、中和右依次为生态系统蒸散与降水量、表层土壤含水量和深层土壤含水量的曲线拟合关系.

Fig. 8 Fitting curve of monthly evapotranspiration with precipitation, surface and deep soil water content over five forest ecosystems in Yunnan. a, b & c, tropical rainforest; d, e & f, rubber plantation; g, h & i, savanna; j, k & l, subtropical evergreen broad-leaved forest; m, n & o, subalpine coniferous forest. The left, middle, and right panels are fitting curve of evapotranspiration with precipitation, surface soil water content, and deep soil water content, respectively.

被蒸腾相似的日变化规律. 在热带雨林和橡胶林中, 干季蒸散日变化曲线在温度最高的时候(辐射

最强时)急剧下降(图 3f 和 3g), 这是因处于热带的西双版纳地区中午的蒸发需求过高, 植物叶片气孔

的阻抗增加抑制了植物自身的蒸腾作用,从而使森林的蒸散减小^[31-33],显示热带森林生态系统在应对高温时有一定的自我调节能力,能适当关闭叶片气孔降低蒸散,以应对高温胁迫。

云南不同森林生态系统蒸散量的年变化趋势基本上都表现为单峰形式(图 4 和 6),这与路倩倩等^[34]对长白山温带针阔混交林、千烟洲亚热带人工常绿针叶林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林的蒸散研究结果相似。有研究发现,森林月蒸散量的年变化峰值出现在 6、7 月,而最小值出现在 12、1 月^[34],本研究中除橡胶林外,其它森林生态系统的结果与之相似,这是因峰值出现时期温度较高、降水多,同时辐射充足、植被生长最旺盛^[34],增加了地表蒸发和植被蒸腾,从而使森林蒸散达到最大;最小值出现的时期刚好相反。此外,云南各森林生态系统在雨季的蒸散波动较干季明显,但原因不尽相同:热带雨林的日蒸散量在 7、8 月波动明显(图 4a),可认为是持续、集中的降水使生态系统蒸散受到一定程度的抑制;稀树灌草在降水量峰值出现的 7 月波动非常明显(图 4c),显示了降水对生态系统蒸散的激发效应。此外,稀树灌草的年总蒸散最低,除受水分的制约外,也反映了在长期进化过程中形成的叶片较小、角质层较厚、表面具蜡质和较光滑等特性^[20]对蒸散的影响,同时稀树灌草在干季落叶,导致植被蒸腾减小,使蒸散维持在较低水平。

本研究中,处于低纬度地区的热带雨林和橡胶林的年蒸散明显大于较高纬度的亚高山针叶林,常绿阔叶林的蒸散大于亚高山针叶林,这与 Komatsu 等^[1]、Yao 等^[2]和路倩倩等^[34]的研究结果相似,即低纬度亚热带地区蒸散量明显高于高纬度温带地区、常绿林蒸散量高于落叶林、阔叶林蒸散量大于针叶林。但本研究中较高纬度的常绿阔叶林多年平均蒸散量与热带雨林和橡胶林相差不大,虽然常绿阔叶林所得到的太阳辐射能低于西双版纳地区,但其丰沛的降水及较高的土壤水分(图 2d)能为森林蒸散耗水提供充足水源,且夜间维持在较高蒸散水平(图 3d),因而其蒸散量与热带地区的森林蒸散相当。李志恒^[26]直接观测得到西双版纳热带雨林多年平均年蒸散量为 730 mm,而在用“波纹比能量闭合”方法对湍流通量进行校正后得到的该生态系统年蒸散总量为 1 029 mm,刘文杰等^[35]用同位素技术和水量平衡法得到该森林生态系统的年蒸散

量分别为 1 186 mm 和 987 mm, Tan 等^[36]通过涡度相关法和水量平衡法得到其年总蒸散量分别为 927 mm 和 969 mm,本研究中直接观测计算得到的热带雨林多年平均年蒸散量仅为 795.68 mm,与李志恒^[26]的研究结果在未进行校正时相似。可见,采用不同方法估算的蒸散是存在差异的,多年观测结果相对更可信。

Tan 等^[36]采用水量平衡法和涡度相关技术计算的橡胶林年蒸散量分别为 1 137 mm 和 1 125 mm,而热带雨林仅为 969 mm 和 927 mm,从而认为橡胶林在西双版纳地区扮演了“抽水机”的角色。但本研究表明,从更长时间尺度上看,西双版纳地区热带雨林生态系统多年平均年蒸散 795.68 mm 和橡胶林年蒸散 774.54 mm 的数值差异并不大,这是因成熟橡胶林(中龄期,1982 年定植)的水分利用与热带雨林接近,也可能是在干季橡胶林蒸散受落叶效应(图 5)影响而显著减小。此外,林友兴等^[19]通过树干液流技术得到相同研究样地的橡胶林 2013—2014 年的平均林分蒸腾量为 784.85 mm,与本研究结果相近,一是因橡胶林较其它森林的结构组成单一,其蒸散主要来源于橡胶树蒸腾;另一方面可能是因涡度相关技术测定蒸散时橡胶林对蒸腾水汽进行了冠层尺度的重吸收和再利用^[37],以及夜间橡胶林从大气中获取少许水汽并在叶片上凝结为雾、露水。

3.2 各生态系统蒸散量与降水量、土壤含水量的关系 植被蒸腾是森林生态系统蒸散中的最重要的成分,受植被覆盖度、蒸腾可利用土壤含水量、太阳辐射、空气湿度、风等多个生物和环境因子的共同影响^[38]。净辐射、气温、饱和水汽压差和降水量等气候因子对生态系统的蒸散的季节变异有直接或间接的作用^[34]。有研究表明,生态系统的蒸散与辐射存在较强的正相关,而与气温存在较弱的相关性,与饱和水汽压差存在弱的正相关^[29]。路倩倩等^[34]发现森林蒸散与净辐射有显著的相关性,是控制其蒸散季节变异的最重要因素。

本研究中,只将云南不同森林蒸散量与表层土壤含水量、深层土壤含水量和降水量进行曲线拟合,发现稀树灌草的蒸散量与表层土壤含水量的相关程度均高于其它森林生态系统(图 8),表明像元江干热河谷这样主要受水分限制的地区,土壤含水量是控制生态系统蒸散的主要因素,这和 Villarreal 等^[39]的研究结果相似。此外,各森林生态

系统的蒸散量与降水量均为开口向下的二次“抛物线”的曲线形式(图 8), 表明在一定范围内生态系统蒸散随降水量增加而先增后减, 即森林蒸散对降水的响应存在一个阈值, 在阈值内两者呈现正相关, 超出阈值后, 降水对蒸散的抑制明显。同样, 森林蒸散与土壤含水量也存在类似规律, 如稀树灌草丛(图 8h 和 8i) 和亚高山针叶林(图 8n 和 8o)。可见, 森林蒸散对水分条件存在一定耐受限度, 这是森林对气候和环境因子长期适应的结果。

在热带雨林(图 8b 和 8c)、橡胶林(图 8e 和 8f) 和亚热带常绿阔叶林(图 8k 和 8l) 中, 实测结果表明这 3 个森林生态系统的蒸散随土壤含水量增加均表现出先稍有减小再增加的规律, 其蒸散最小时对应的表层(深层)土壤含水量阈值分别为 11.80%(7.16%)、11.98%(7.74%) 和 24.41%(23.67%), 我们认为这是森林生态系统对水分利用的一种策略: 在水分条件充足时, 森林可以利用雾露水、表层土壤水和深层土壤水等用于蒸散; 在表层土壤含水量高于其最低阈值时, 可利用表层土壤水分和深层土壤水分进行蒸散; 当土壤水分介于深层和表层土壤含水量各自的最低阈值之间时, 森林生态系统倾向于只利用深层土壤水。这种水分利用策略可能是森林在长期应对干旱胁迫所形成的适应性机制, 从而增强了生态系统稳定性。

致谢: 感谢中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室全球变化研究组的博士后 Balasubramanian 对英文摘要进行修改; 感谢中国科学院西双版纳热带植物园哀牢山亚热带森林生态系统研究站、西双版纳热带雨林生态系统研究站、元江干热河谷生态站, 以及中国科学院昆明植物研究所丽江森林生态系统定位研究站提供的支持。

参考文献:

- [1] Komatsu H, Tanaka N, Kume T. Do coniferous forests evaporate more water than broad-leaved forests in Japan?[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3-4): 361-375.
- [2] Yao Y J, Liang S L, Cheng J, et al. MODIS-driven estimation of terrestrial latent heat flux in China based on a modified Priestley-Taylor algorithm[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171: 187-202.
- [3] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Yu G R, Wang Q F. *Ecophysiology of plant photosynthesis, transpiration, and water use*[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [4] Yang X H, Zhou Q M, Mevlille M. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(2): 453-459.
- [5] Amarakoon D, Chen A, Mclean P. Estimating daytime latent heat flux and evapotranspiration in Jamaica[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102(2-3): 113-124.
- [6] Devitt D A, Morris R L, Neuman D S. Evapotranspiration and growth response of three woody ornamental species placed under varying irrigation regimes[J]. *Journal of American Social Sciences*, 1994, 119(3): 452-457.
- [7] 吴力立, 董家文. 林内蒸发量的研究[J]. *南京林业大学学报*, 1999, 23(3): 55-59.
Wu L L, Dong J W. A study on the evaporation of stands[J]. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1999, 23(3): 55-59.
- [8] 王治国, 张云龙, 刘徐师. 林业生态工程学-林草植被建设的理论与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.
Wang Z G, Zhang Y L, Liu X S. *Forest ecological engineering: Theory and practice of vegetation reconstruction*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2000.
- [9] Bussi eres N, Granger R J, Strong G S. Estimates of regional evapotranspiration using GOES-7 satellite data: Saskatchewan case study, July 1991[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1997, 23(1): 3-14.
- [10] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [11] Mueller B, Hirschi M, Jimenez C, et al. Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-dataset synthesis[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17: 3707-3720.
- [12] Zhang Y Q, Peña-arancibia J L, Mevicar T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19 124.
- [13] Lin Y, Wang G X, Guo J Y, et al. Quantifying evapotranspiration and its components in a coniferous subalpine forest in Southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(20): 3 032-3 040.
- [14] 窦军霞, 张一平, 于贵瑞, 等. 西双版纳热带季节雨林水热通量[J]. *生态学报*, 2007, 27(8): 3 099-3 109.
Dou J X, Zhang Y P, Yu G R, et al. Inter-annual and

- seasonal variations of energy and water vapour fluxes above a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, SW China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(8): 3 099-3 109.
- [15] 周文君, 沙丽清, 沈守良, 等. 西双版纳橡胶林土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 317-325.
Zhou W J, Sha L Q, Shen S G, et al. Seasonal change of soil respiration and its influence factors in rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in Xishuangbanna, SW China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 317-325.
- [16] 张树斌, 张教林, 曹坤芳. 干旱对干热河谷优势木本植物虾子花光能分配的影响[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(5): 774-780.
Zhang S B, Zhang J L, Cao K F. The effects of drought stress on light energy dissipation of *Woodfordia fruticosa*, a dominant woody species in Yuanjiang dry-hot valley, Southwest China[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2014, 36(5): 774-780.
- [17] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(4): 528-544.
- [18] 谭正洪. 西双版纳热带季节雨林生态系统碳平衡研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
Tan Z H. 2011. The carbon balance of primary tropical seasonal rain forest[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [19] 林友兴, 张一平, 赵玮, 等. 不同林龄橡胶林蒸腾特征的比较[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(4): 855-863.
Lin Y X, Zhang Y P, Zhao W, et al. Comparison of transpiration characteristics in different aged rubber plantations[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(4): 855-863.
- [20] 张教林, 郝广友, 曹坤芳. 云南元江干热河谷木本植物的物候[J]. *武汉植物学研究*, 2009, 27(1): 76-82.
Zhang J L, Hao G Y, Cao K F. Phenology of woody species in Yuanjiang Dry-Hot Valley in Yunnan Province[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2009, 27(1): 76-82.
- [21] 吴征镒. 云南哀牢山森林生态系统研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1983.
Wu Z Y. Studies on the forest ecosystem in Ailao Mountains in Yunnan[M]. Kunming: Yunnan Science & Technology Press, 1983.
- [22] 云南省林业调查规划院. 云南自然保护区[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.
Yunnan Institute of Forest Inventory and Planning. 1989. Nature reserves in Yunnan[M]. Beijing: China Forestry Press, 1989.
- [23] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods[J]. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331-1340.
- [24] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 97-120.
- [25] 张晓娟, 吴志祥, 杨川, 等. 海南岛橡胶林生态系统水汽通量及其影响因子研究[J]. *热带作物学报*, 2015, 36(8): 1 432-1 439.
Zhang X J, Wu Z X, Yang C, et al. Water vapor flux exchange and its environmental factors in a tropical rubber plantation ecosystem in Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2015, 36(8): 1 432-1 439.
- [26] 李志恒. 西双版纳热带季节雨林蒸散特征及其模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
Li Z H. Evapotranspiration and its simulation in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, Southwest China[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [27] 牛晓栋, 江洪, 方成圆, 等. 天目山常绿落叶阔叶混交林生态系统水汽通量特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(2): 216-224.
Niu X D, Jiang H, Fang C Y, et al. Water vapor flux features of an evergreen and deciduous broadleaf mixed forest in Mount Tianmu Area[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2016, 33(2): 216-224.
- [28] 赵平, 饶兴权, 马玲, 等. 基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(4): 655-665.
Zhao P, Rao X Q, Ma L, et al. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia Mangium* forest[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2006, 30(4): 655-665.
- [29] 宋清海, 张一平, 谭正洪, 等. 热带雨林冠层树种绒毛番龙眼树冠蒸腾及其与气候因子的关系[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(3): 6-8, 23.
Song Q H, Zhang Y P, Tan Z H, et al. Canopy transpiration and its relationship with meteorological factors of *Pometia tomentosa* in tropical rain forest[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(3): 6-8, 23.
- [30] 赵玮, 张一平, 宋清海, 等. 橡胶树蒸腾特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1 803-

- 1 810.
Zhao W, Zhang Y P, Song Q H, et al. Characteristics of transpiration of rubber trees (*Hevea brasiliensis*) and its relationship with environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(7): 1 803-1 810.
- [31] da Rocha H R, Goulden M L, Miller S D, et al. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia[J]. Ecological Applications, 2004, 14(S4): S22-S32.
- [32] Pejam M R, Arain M A, Mccaughey J H. Energy and water vapour exchanges over a mixedwood boreal forest in Ontario, Canada[J]. Hydrological Processes, 2006, 20(17): 3 709-3 724.
- [33] Giambelluca T W, Martin R E, Asner G P, et al. Evapotranspiration and energy balance of native wet montane cloud forest in Hawai'i[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(2): 230-243.
- [34] 路倩倩, 何洪林, 朱先进, 等. 中国东部典型森林生态系统蒸散及其组分变异规律研究[J]. 自然资源学报, 2015, 30(9): 1 436-1 448.
Lu Q Q, He H L, Zhu X J, et al. Study on the variations of forest evapotranspiration and its components in Eastern China[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1 436-1 448.
- [35] 刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林地下土壤蒸发的稳定性同位素分析[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1 303-1 311.
Liu W J, Li P J, Li H M, et al. Estimation of evaporation rate from soil surface using stable isotopic composition of throughfall and stream water in a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1 303-1 311.
- [36] Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. Rubber plantations act as water pumps in tropical China[J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(24): L24406.
- [37] 刘文杰, 李鹏菊, 李红梅, 等. 西双版纳热带季节雨林冠截留雾水和土壤水的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(1): 9-15.
Liu W J, Li P J, Li H M, et al. Fog interception and its relation to soil water in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 9-15.
- [38] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, et al. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: Application of a two-source model[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1 410-1 420.
- [39] Villarreal S, Vargas R, Yopez E A, et al. Contrasting precipitation seasonality influences evapotranspiration dynamics in water-limited shrublands[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016, 121(2): 494-508.

Comparative study of evapotranspiration characteristics over different forest ecosystems in Yunnan Province, Southwest China

LIN You-xing^{1,6}, ZHANG Yi-ping^{1,2**}, FEI Xue-hai^{1,6}, SONG Qing-hai¹, XU Kun⁵, DENG Yun³,

LIU Wei-wei⁵, CHEN Ai-guo⁴, LI Pei-guang⁴, HUANG Hua⁵, JIN Yan-qiang^{1,6}, LI Jing^{1,6}

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China;

2. Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong 676209, China;

3. Xishuangbanna Station for Tropical Rainforest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China;

4. Yuanjiang Savana Ecosystem Research Station, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yuanjiang 653300, China;

5. Lijiang Forest Ecosystem Research Station, Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Lijiang 674100, China;

6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Evapotranspiration in five major forest ecosystems in Yunnan was measured using eddy covariance from 2003 to 2015. The characteristic and variation of evapotranspiration were compared, and the relationship between evapotranspiration and soil water content as well as precipitation was analyzed in the present study. The results showed that the dynamic patterns of diurnal evapotranspiration of five forest ecosystems were all characterized by a single-peak curve, but the occurrence of peaking time and the patterns in diurnal evapotranspiration were not consistent. Both daily and monthly evapotranspiration among five forest ecosystems followed an unimodal curve form. Maximum evapotranspiration rate was observed during July and minimum during January. Likewise, the seasonal evapotranspiration was characterized by the highest evapotranspiration during rainy season and lowest during the dry season. The multi-year mean annual evapotranspiration (the percentage of evapotranspiration to precipitation) of the tropical rainforest, rubber plantation, savanna, subtropical evergreen broad-leaved forest, and subalpine coniferous forest was 795.68 mm (55.05%), 774.54 mm (59.77%), 435.35 mm (56.58%), 767.69 mm (52.80%), and 438.83 mm (42.17%), respectively. It implied that the moisture of those forest ecosystems is sufficient. The relationship between evapotranspiration and soil water content was not the same over different forest ecosystems, which showed that the water-use strategies were varied among different forest ecosystems. The results provided a scientific basis for the assessment of ecological hydrological effects and water-use strategies of forest ecosystems, and the understanding of the responses to climate changes.

Key words: forest ecosystem; eddy covariance; evapotranspiration; water-use strategy; Yunnan