西北林学院学报 2021,36(1):77-85
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2021.01.11

海南儋州地区橡胶林生态系统水汽通量变化特征及其对环境因子的响应

耿思文[1,2,3],吴志祥[1,2,3*],杨 川[1,2]

(1.中国热带农业科学院 橡胶研究所,海南 海口 571101;2.农业农村部 儋州热带作物科学观测实验站,海南 儋州 571737;3.海南大学 林学院,海南 海口 570228)

摘 要:运用涡度相关观测技术对海南儋州地区的橡胶人工林(简称橡胶林)进行长期观测,研究了2017—2018年水汽通量变化特征,并结合该地区的梯度系统数据以及气象观测数据,分析了水汽通量对环境因子的响应;同时根据降雨量和蒸散量对该生态系统的水分收支情况进行探讨,以揭示橡胶林生态系统的水分利用能力。结果表明:1)2017—2018年橡胶林生态系统水汽通量为正值,即水汽通过生态系统向大气散发,表现为水汽源;水汽通量日变化曲线为单峰形,在11:00—13:00达到最大值,雨季日间的水汽通量约为旱季的3倍,全年夜间水汽通量保持平稳且接近于0,水汽通量表现出明显的季节变化,雨季(5—10月)最高,旱季(1—4月)次之,11—12月最低;2)2017、2018年度总降雨量分别为1 687.6、2 264.7 mm,蒸散总量为962.24、1 209.29 mm,分别占降雨的57.02%、53.40%;旱季蒸散量约为降雨的2倍,雨季6—10月常出现当月降雨量远大于蒸散的情况,且年蒸散量和降雨量均集中在6—9月;3)影响水汽通量的主要环境因子有净辐射、气温、饱和水汽压差、风速、土壤热通量、土壤含水量等,其中净辐射和大气温度是影响水汽通量的最主要因素,尤其在水分充沛的雨季相关性最高。4)海南儋州橡胶林的蒸散量略高于热带雨林,但其蒸散率属于正常水平,不是导致植胶区缺水的主要因素。

关键词:海南人工橡胶林;涡度相关;水汽通量;蒸散;净辐射

中图分类号:S718.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2021)01-0077-09

Water Vapor Flux Exchange of Rubber Forest Stand in Hainan Danzhou and Its Response to Environmental Factors

GENG Si-wen[1,2,3],**WU Zhi-xiang**[1,2,3*],**YANG Chuan**[1,2]

(1.*Rubber Research Institute*,*Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences*,*Haikou* 571101,*Hainan*,*China*; 2.*Danzhou Investigation & Experiment Station of Tropical Crops*,*Ministry of Agriculture and Rural Affairs*,*Danzhou* 571737,*Hainan*,*China*; 3.*Institute of Forestry*,*Hainan University*,*Haikou* 570228,*Hainan*,*China*)

Abstract:Using field data from the eddy-covariance (EC) fluxtower for long-term observation,we investigated the magnitudes and changes of water vapor flux (WVF) in rubber plantations in Danzhou,Hainan during 2017—2018. The objectives were to analyze the responses of WVF to environmental factors,and to explore the dynamic process of evapotranspiration (ET). According to precipitation and ET,we explored the water budget and water utilization capacity of the ecosystem of rubber plantations. The results showed that 1) the WVF of rubber plantation ecosystem was basically positive in 2017—2018,and the water was transmitted to the atmosphere through the rubber plantations,manifested as water vapor sources. The

收稿日期:2020-03-12　**修回日期**:2020-05-05

基金项目:2019年海南省基础与应用基础研究计划高层次人才项目(2019RC330);天然橡胶产业技术体系橡胶园生态岗位科学家经费(CARS-33-ZP3)。

作者简介:耿思文。研究方向:森林生态水文。E-mail:sevengeng@foxmail.com

***通信作者**:吴志祥,博士,研究员,博士生导师。研究方向:热带人工林碳氮、水热耦合及生长模拟,人工林生态系统长期定位观测。E-mail:zhixiangwu@catas.cn

characteristics of daily WVF variation curve was a single-peak,reaching the maximum value between 11:00 and 14:00. The WVF in the daytime in rainy season was about three times that in the dry season,and at night remained stable and close to 0 in the whole year. It also presented a seasonal variation:(May to October>(January to April>November to December. 2) The annual precipitations in 2017 and 2018 were 1687.6 and 2 264.7 mm,while the annual evapotranspirations were 962.24 and 1 209.29 mm,which accounted for 57.02% and 53.40% of the rainfall,respectively. In dry season,evapotranspiration was about twice as much as the rainfall,and in the rainy season,the monthly rainfall was usually much more than evapotranspiration. The maximum precipitation and evapotranspiration both occurred in the rainy season. 3) The environmental factors influencing WVF were net radiation,temperature,saturation vapor pressure, wind speed,soil heat flux and soil volumetric moisture content. The most significant factors were the net radiation and the air temperature. The WVF showed a significant positive correlation with the net radiation (R_n),and the WVF also showed a significant positive correlation with the atmospheric temperature (T_a). 4) The evapotranspiration of rubber plantations in Danzhou was slightly higher than that of tropical rain forest,but the evapotranspiration rate was normal and was not the main factor leading to water shortage in the rubber planting area.

Key words: Hainan rubber plantation; eddy covariance; water vapor flux; evapotranspiration; net radiation

森林生态系统水文过程研究是探究流域或区域水文过程的基础和关键,有重要的研究价值[1]。水汽通量是指在单位时间内通过单位面积的水汽量,森林生态系统水汽通量主要包括植被蒸腾、冠层截留降水蒸发以及土壤水分蒸发三部分通量之和[2],是森林生态系统物质循环与能量流动过程中的重要环节和重要载体,在森林物质循环与能量流动中都起着重要作用。蒸散和水汽通量是重要的水分状况指标,是地球陆地表面水分的重要来源[3],研究水汽输送过程对于了解森林生态系统的水分循环特征、物质流动和能量分配、深入理解其结构和进程等有重要的意义[4,5]。近年来,涡度相关法由于能较准确、长期连续地对地表—大气间的湍流进行观测,能同时测定气象因子以及各能量组分[6],且对环境及生态系统干扰小,因此该方法已成为国际通量观测网通量观测的标准方法,在陆地生态系统物质循环和能量流动中得到广泛应用[7,8],国内学者也利用此方法对多种陆地生态系统水汽循环过程进行了观测和研究[9-11]。

热带天然橡胶(Hevea brasiliensis)人工林在海南、云南、广东等地大面积推广种植,是旱地建立的最好生态系统之一[12]。本研究以海南儋州地区橡胶林为对象,利用涡度相关观测技术研究其2017—2018年间水汽通量的变化特征,结合降雨量探究水分收支情况,为橡胶林的水分管理提供一定理论支持,从而达到提升栽培管理效率和产量的目的。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于海南省西北部中国热带农业科学院实验农场第三试验区,农业部儋州热带农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站内(19°32′47″N,109°28′30″E),海拔高度 114 m,地形平坦,年均温 23.5℃～24.1℃,属典型热带海岛季风气候,受热带季风影响旱雨季分化明显,5—10 月份是雨季,11 至翌年 4 月为旱季,年均降水量约 1 800 mm。样地所在的橡胶林品系为热研 7-33-97,2001 年种植,2008 年试割,2009 年正式开割[13],栽植密度(3 m×7 m)。试验区土壤为砂质黏壤土,土层厚度约 100 cm,通透性好,蓄水保肥能力较差。胶林结构单一且分层明显,上层为橡胶林乔木层,林冠高度 20 m,下层为林下草本层,高度 0.5 m。样地林下间种鹤望兰(*Strelitzia reginae*),其余自生草本植物主要有弓果黍(*Cyrtococcum patens*)、山麻杆(*Alchornea rugosa*)、露籽草(*Ottochloa nodosa*)、竹节草(*Chrysopogon aciculatus*)、杯苋(*Cyathula prostrata*)、含羞草(*Momosa pudica*)等[14]。

1.2 研究方法

1.2.1 通量观测方法 试验地中设有 50 m 高的观测塔,塔上分层设置相应的观测和数据收集仪器。与研究相关的主要包括开路涡度协方差系统(open path eddy covariance,OPEC)和森林常规气象梯度观测系统(routine meteorological system,RMET)。其中 OPEC 安装高度为 25 m,包括三维超声风速仪 CSAT-3、开路红外 CO_2/H_2O 气体分析仪 Li-7500、数据采集器 CR3000 共 3 部分,取样频率为 10 Hz;RMET 系统沿观测塔垂直分布在地上和地下两部分,所采集的气象因子包括净辐射(25 m 处)、风速、空气温湿度(1.5、6、10、15、41、50 m 处)、冠层、地表

温度(1.5、30 m 处)等,并配有 2 个 CR3000(2、30 m 处)采集数据。铁塔数据的原始采集以及处理采用 Campbell 公司提供的 Loggernet 软件完成[13]。另外降雨等气象数据参考两院地面气象记录报表。

涡度相关法是直接测定大气与植物群落气体交换量的通用标准方法[8,15-17]。本试验区内下垫面平坦,林相均匀整齐,符合相关观测要求。通过相关涡度系统实时测得的相关数据,可以求得水汽通量和蒸散量[9]。

1.2.2　计算公式　水汽通量(E)用实时测定的垂直风速与水汽浓度的协方差求得,计算公式为:

$$E=\overline{\rho w'q'} \tag{1}$$

式中,ρ 为干空气密度,q 为比湿脉动,w 为垂直风速,横线为一段时间内的平均值;撇号表示脉动。且规定若水汽由生态系统进入大气为通量值符号为正,反之为负[18]。

通过潜热通量(LE)计算蒸散量(ET)的公式为:

$$ET=\frac{0.43LE}{(597-0.564T)} \tag{2}$$

式中,LE 单位为 $\mathrm{w \cdot m^{-2}}$,$(597-0.564\mathrm{T})$为水的汽化热/$(\mathrm{J \cdot g^{-1}})$,$T$ 为冠层高处的空气温度,0.43 为单位转换系数。蒸散量(ET)通过一日之内各 0.5 h 尺度的值相加得到/$(\mathrm{mm \cdot d^{-1}})$[9]。

1.3　数据处理

所用数据为通量观测的 30 min 尺度平均值。数据处理采用英国爱丁堡大学研究的 EdiRe 软件,处理过程主要包括野点(异常值或奇异点)剔除、延迟时间校正、三维坐标旋转校正垂直风速等[19]。在此基础上,还对数据进行了筛选:剔除了恶劣天气、传感器异常等原因造成的不合理数据;剔除湍流混合 较弱的数据(即摩擦风速 $u*<0.1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$);剔除 30 min 记录不完整(缺失>3%)的数据[20]。对于缺失数据的插补,有研究表明平均日变化法与非线性回归方法适合用于较小窗口的数据插补[20-22],由于本研究中数据最大缺失窗口为 2 d,因此选择 2 种方法结合对数据进行插补:对于缺失窗口≤2 h 的利用平均日变化法插补,及使用邻近几天同时刻的平均值插补[23-24]。

数据统计分析用 Microsoft Office Excel 以及 SAS 9.2 软件。

2　结果与分析

2.1　橡胶林生态系统水汽通量变化特征

对海南橡胶林 2017－2018 年的水汽通量数据插补计算,得到海南儋州人工橡胶纯林生态系统 2 a 间逐日逐 0.5 h 水汽通量数据,并分别对旱季(1－4 月、11－12 月)雨季(5－10 月)每天同时刻的水汽通量求平均值得其月平均日变化(图 1)。

橡胶林水汽通量总体特征为:2017－2018 年绝大部分时间内水汽通量为正值,且旱季远高于雨季。全年最高日出现在 7 月,最低在 2 月。由图 1 可知,橡胶林全年水汽通量基本为正值,即水汽由橡胶林向大气释放,为水汽源。水汽通量日变化整体趋势呈单峰形,夜间水汽通量保持平稳,且基本为 0;6:30－7:00 水汽通量开始增大,在 12:00－13:00 到达峰值,而后逐渐减小,至 17:30－19:00 又趋近于 0。因为夜间温度较白天低,光照强度弱,水分蒸发和植物蒸腾作用都比白天弱。而白天,随着日出,光照强度增大,温度逐渐升高,水汽通量随之开始增加,当太阳达到正午太阳高度前后时,水汽通量达到最大值,下午温度与光照强度减小,水汽通量也随之减小,直至日落,水汽通量再次趋近于 0。

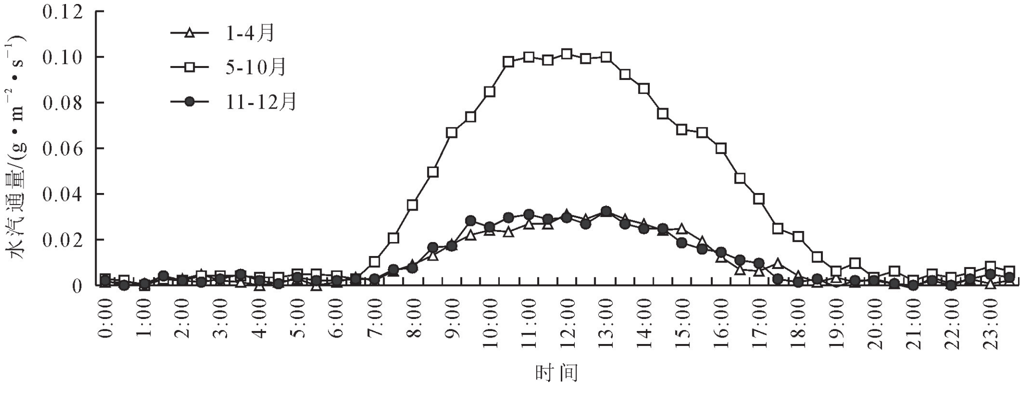

图 1　2017－2018 年橡胶林生态系统不同季节水汽通量平均日变化

Fig.1　Mean diurnal dynamics of water vapor flux in rubber plantation ecosystem in different seasons during 2017－2018

由于旱季日照时间长,日出早、日落晚,因此水汽通量也明显早于雨季开始升高,迟于雨季复位,且始终明显高于雨季,最大值约为雨季的 2～3 倍。雨季是橡胶林的主要生长季,温度、光照强度和降雨等都高于旱季,雨热同期加剧了橡胶林的生物活动,植物蒸腾、水分蒸发作用都更剧烈,生态系统蒸散强度

大。另外雨季曲线较平滑，旱季曲线呈现锯齿状波动，是由于旱季气候多变，温度、湿度经常波动，水汽通量的变化相应发生变化。另一方面，老叶脱落和新叶萌发都发生在旱季，导致叶面积等生物因素的不稳定，同样影响水汽通量的稳定。

日周期内水汽通量变化趋势呈明显的单峰形，夜间水汽通量趋近于零且保持平稳，6:30－7:00 随日出水汽通量开始增大，到达正午时日照、温度达到最强，水汽通量也逼近峰值，随后峰值逐渐减小，至 17:30－19:00 随日落又趋近于 0，此后在夜间基本保持在 0 左右的正值，19:00－0:00 相比 0:00－6:00 时的波动更加明显。5～10 月(即雨季)的水汽通量曲线开始增大较旱季更早，曲线回落较旱季更晚，这与雨季的日照时长更久有关。日间水汽通量在 10:15－14:15 到达峰值，旱季的峰值区间在 0.030 2～0.068 8 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，雨季的区间为 0.113 6～0.159 3 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。因为此时段的日照最强，气温达到当日最高，植物蒸腾、地表和截留蒸发活动都比较剧烈。

对比橡胶林旱、雨季的日间水汽通量，发现雨季远大于旱季，且曲线平滑。因为雨季对应橡胶林的主要生长季，生物活动频繁，植物蒸腾作用强；并且雨季降水量充沛，温度、光照都强于旱季，因此各类截留雨量的蒸发量也导致总体蒸散强度增大。在旱季由于橡胶林生物活动微弱，蒸腾相应减弱；且旱季降水量少，蒸发量减少，蒸腾量成为影响蒸散的主要成分，而影响蒸腾的环境因素比影响蒸发的要更为复杂，旱季气候条件不稳定，导致曲线相对不平滑，且水汽通量较小，但总体依然表现为水汽源。

由表 1 可见，2017－2018 年水汽通量各月最大值在 0.030 2～0.159 3 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，旱季最大值出现时间往往迟于雨季，但都出现在 10:15－14:15，因为此时温度、光照强度都是 1 d 内最高，蒸腾蒸发作用都非常旺盛。各月水汽通量最小值在 －0.007 7～0.002 9 $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$，且均出现在夜间，因为此时温度相对白天低，光照强度弱，蒸腾作用几乎停止，蒸发量也远小于白天。雨季的最小值出现时间多在傍晚，这可能是由于雨季下午降雨频繁，伴随着气温和净辐射的回落，导致生态系统水汽向外输送的效率降低。

表 1　2017－2018 年各月水汽通量最大值、最小值和平均值

Table 1　The maximum, minimum and mean values of monthly water vapor flux in 2017－2018

月份	最大值 /($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	最大值出现时刻	最小值 /($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)	最小值出现时刻	平均值 /($g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
1 月	0.050 3	14:15	－0.006 4	19:45	0.007 8
2 月	0.047 1	13:15	－0.007 6	01:15	0.004 2
3 月	0.068 8	12:15	－0.005 9	00:15	0.009 5
4 月	0.052 5	13:15	－0.002 2	21:15	0.014 3
5 月	0.117 5	10:45	0.002 9	21:15	0.025 9
6 月	0.156 9	12:15	0.002 3	20:15	0.039 6
7 月	0.159 3	12:45	－0.000 8	06:45	0.042 7
8 月	0.148 5	12:45	－0.000 2	01:15	0.034 9
9 月	0.113 6	13:15	0.002 7	20:45	0.026 9
10 月	0.069 3	12:45	－0.007 7	20:45	0.019 0
11 月	0.046	10:15	－0.001 8	19:45	0.010 0
12 月	0.030 2	13:15	－0.001 7	04:45	0.008 2

2.2　橡胶林生态系统蒸散量与降雨量特征

2017、2018 年全年总降水量分别为 1 687.6、2 264.7 mm，蒸散总量为 962.24、1 209.29 mm，分别占降水的 57.02%、53.40%(表 2)。降雨是森林生态系统的主要水分来源，是直接影响植被生长的因素，分析降雨的变化规律是研究水量平衡和森林水文过程的基础。根据往年气象资料显示，试验地的年均降水量约 1 863 mm，雨季降水量占全年总降水的 65%～75%，干湿季区分明显。2018 年降水量高于往年平均水平，蒸散总量也较高，但蒸散率较小，为 53.39%；而 2017 年降水量虽较低，蒸散率高于 2018 年，为 57.02%。雨季降雨量和蒸散量都明显大于旱季，雨季降雨约为全年的 80%，蒸散约为全年的 78%。因此，水分是制约橡胶林在旱季正常生长的因素之一。蒸散的主要活跃时间在 5－10 月，基本与雨季重合。旱季常出现蒸散大于降雨的情况，由于此时降雨相对不足，橡胶林生长需要从土壤获取水分，蒸腾作用剧烈。

由图 2 可以看出，2018 年降雨和蒸散量整体高于 2017 年，其中 2018 年 5－8 月的蒸散量基本相当，2017 年受降雨不稳定的影响，6 月和 8 月的蒸散量略低于雨季平均水平。雨季的6－9月中常出现

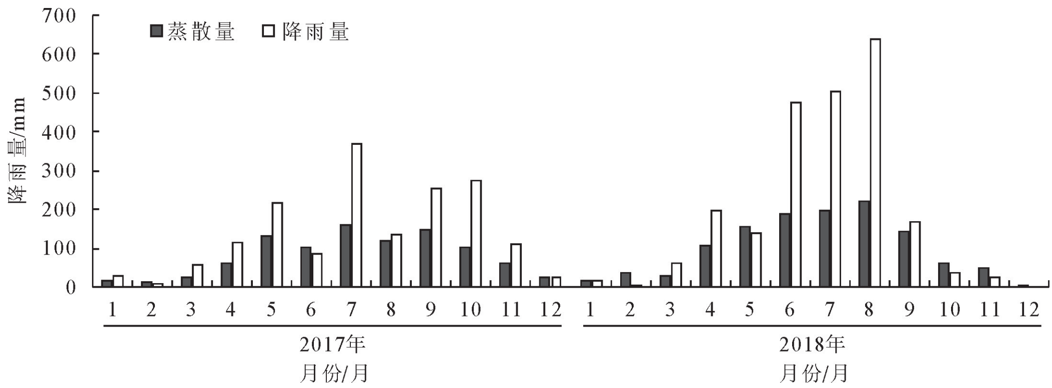

图 2　2017－2018 年橡胶林生态系统降水蒸散动态

Fig. 2　Monthly dynamics of precipitation and evapotranspiration in 2017－2018

表 2　2017－2018 年不同季节降雨量和蒸散量分配情况

Table 2　The precipitation and evapotranspiration of different seasons in 2017－2018

		月份/月	降水		蒸散	
			降水量/mm	比例/%	蒸散量/mm	比例/%
2017	旱季	1－4	210.5	12.47	119	12.37
		11－12	137.2	8.13	86.15	8.95
	雨季	5－7	674.9	39.99	390.14	40.55
		8－10	665.0	39.41	366.95	38.14
	2017 全年		1 687.6	100	962.24	100
2018	旱季	1－4	280.9	12.4	189.14	15.64
		11－12	22.7	1.0	54.63	4.52
	雨季	5－7	1 117.5	49.34	539.68	44.63
		8－10	843.6	37.25	425.84	35.21
	2018 全年		2 264.7	100	1 209.29	100

降雨明显大于蒸散的情况，降雨增加了空气湿度，对蒸散过程产生一定抑制。而旱季中，2017 年 1、2、12 月、2018 年 1 月和 5 月的蒸散量基本与降雨量持平，蒸散明显大于降雨量的有 2018 年 2 月、10 月和 11 月。

2.3　水汽通量对环境因子的响应

影响陆地生态系统水分传输过程的因素主要有水、热两部分。二者在橡胶林生态系统中主要影响因素具体为：净辐射(R_n)、空气温度(T_a)、空气湿度(RH)、饱和水汽压差(VPD)、风速(W_s)、土壤热通量(G_s)、土壤含水量(VWC)等。针对以上因素与水汽通量之间进行线性回归以及相关性分析(表 3)，得到一年中不同时期的主要影响因子。

1－4 月回归方程：

$E=-0.024\,4Ta+0.070\,7RH-3.733\,7VPD+0.010\,4Ws+0.001\,7Rn+0.373\,5G-0.868\,2VWC+17.889\,8(R^2=0.96^{**})$(＊＊表示 $P<0.01$，下同)，其中各环境因子均达到极显著相关水平。

5－10 月回归方程：

$E=-2.16\times10^{-5}Ta-1.533\times10^{-4}RH+0.001\,5VPD+9.213\times10^{-5}Rn-1.852\times10^{-4}G+0.001\,3VWC-0.009\,4(R^2=0.898\,9^{**})$，各环境因子均极显著相关，与旱季相比，风速与水汽通量无明显相关。

11－12 月回归方程：

$E=-6.854\,6\times10^{-4}Ta+8.274\times10^{-5}Rn-5.222\,8\times10^{-4}G+0.204(R^2=0.982\,7^{**})$，影响因子最集中，气温呈显著相关，净辐射和土壤热通量呈极显著相关。

根据以上回归方程以及表 3 中的偏相关分析可以看出，1－4 月受环境因子的影响最为广泛，所列出的 7 个环境因子均达到极显著相关水平，其中净辐射、土壤含水量和饱和水汽压差相关性更高；5－10 月风速不再是显著影响水汽通量的环境因子，净辐射、饱和水汽压差和气温是相关性较高的因子；11－12 月，显著影响的因子仅有净辐射和土壤热通量。全年净辐射是持续稳定对水汽通量变化产生极显著相关的影响因子，旱季时土壤水分和土壤热通量是限制水汽通量的主要因子，雨季时则受饱和水

汽压差和空气温度影响更大。

大部分环境因子仅对森林生态系统水分传输产生阶段性影响,但也有少数能够持续性影响这一过程。刘晨峰等[25]指出,在土壤水分充足的条件下,植被蒸腾对水汽压差的响应程度较低,而无论在干季还是湿季,蒸散过程都对净辐射的变化反应敏感。因此对于橡胶林生态系统来说,水汽输送过程受到净辐射、温度、湿度、风速等环境因素的共同作用,但这些环境因子并不都能持续性的存在显著影响,不同季节的主要影响因素不同。而净辐射和大气温度在不同气候条件下的橡胶林生态系统中,都是显著影响其水汽通量重要的因子[18,26],是水汽向大气输送的主要驱动力[27]。因此选择净辐射和大气温度2个环境因子进行进一步的数据拟合分析和讨论。

表3 不同季节各环境因子与水汽通量的偏相关分析

Table 3 The partial correlation analysis results of water vapor flux and environmental factors in different seasons

月份/月	空气温度	空气湿度	饱和水汽压差	风速	净辐射	土壤热通量	土壤含水量
1—4	0.213 2**	0.443 6**	−0.516 5**	0.433 9**	0.832**	0.443 6**	0.71**
5—10	0.302 4**	−0.135 1**	−0.408 6**	0.020 4*	0.766 4**	−0.099 8**	0.083 2**
11—12	−0.041 6	−0.009 3	−0.004 6	−0.040 8	0.510 7**	−0.043 9*	0.010 8

注:*表示相关系数的显著性概率 $P<0.05$ 为差异显著,**表示 $P<0.01$ 为差异极显著。

2.4 净辐射对水汽通量的影响

由图3可知,水汽通量与净辐射呈正相关,但并不随着净辐射的增大而无限增大,净辐射值升高,水汽通量的增速则会减缓。其中,雨季(5—10月)相关性最好,$R^2=0.698\ 3$;其次是1—4月,$R^2=0.358\ 6$;最差的是11—12月,$R^2=0.252\ 1$,则雨季净辐射对水汽通量的影响更为显著。这与X. B. Ji et al.[27]的结论相符。

水汽通量的峰值与净辐射的变化趋势类似,但并非完全一致。由图4可以看出,在日变化中,当净辐射达到午后次高峰时,特别是炎热的夏季,叶片会关闭一部分气孔,这被称为叶片的"蒸腾午休现象"[28]。因此在这段时间内,水汽通量值降低,午后又会伴随环境因子的波动出现小幅度的升高,但不会再超过午间出现的峰值,整体呈下降趋势,直至夜间达到最低值。

2.5 大气温度对水汽通量的影响

图5表明,水汽通量随着气温升高而增大,与净辐射不同的是,气温越高,水汽通量的增速越快。雨季(5—10月)的相关性最好,$R^2=0.677\ 9$;其次是1—4月,$R^2=0.369\ 4$;相关性最差是11—12月,$R^2=0.274\ 1$,与净辐射的顺序一致。由图6可知,1 d内水汽通量的峰值比气温峰值早出现2 h左右,同样由于蒸腾午休现象,导致总体蒸散量降低。与图5对比,水汽通量的峰值与净辐射更为接近,但变化趋势与气温更为相似。

3 结论与讨论

3.1 橡胶林生态系统水汽通量变化特征

橡胶林水汽通量总体特征为:2017—2018年,绝大部分时间内水汽通量为正值,说明人工橡胶林为水汽源,且旱、雨季呈现明显不同,旱季远高于雨季。全年最高出现在7月,最低为2月。日周期内水汽通量变化趋势呈明显的单峰形,夜间水汽通量趋近于0且保持平稳,对比橡胶林旱、雨季的日间水

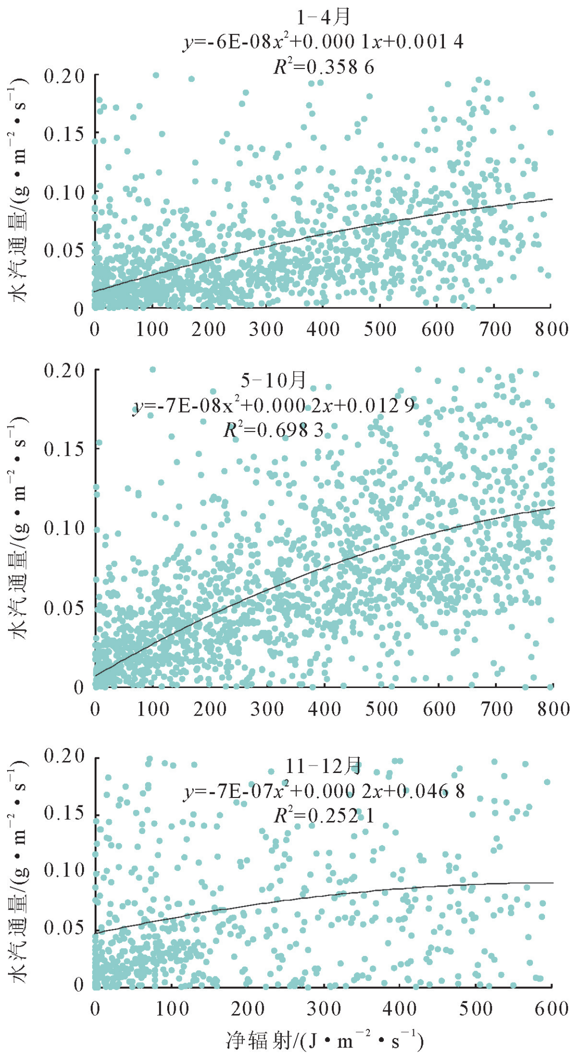

图3 橡胶林生态系统水汽通量对净辐射的响应拟合

Fig. 3 The response of water vapor flux to net radiation in rubber plantation ecosystem

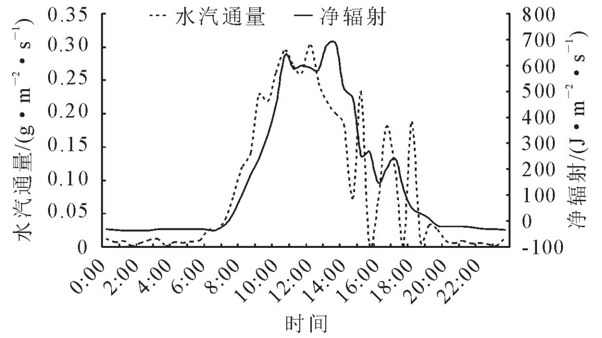

图 4　生长季橡胶林水汽通量和净辐射的典型日变化

Fig. 4　Diurnal change of water vapor flux and net radiation during growth season

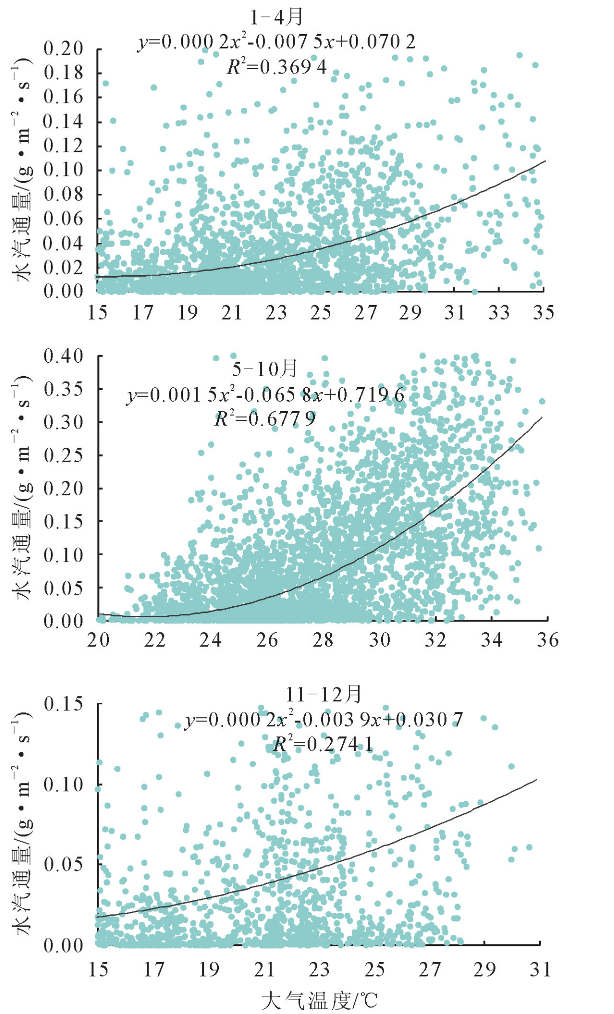

图 5　橡胶林生态系统水汽通量对大气温度的响应拟合曲线

Fig. 5　The response of water vapor flux to air temperature in rubber plantation ecosystem

汽通量,发现雨季远大于旱季,且曲线平滑。因为雨季对应橡胶林的主要生长季,生物活动频繁,植物蒸腾作用强;并且雨季降水量充沛,温度、光照都强于旱季,因此各类截留雨量的蒸发量也导致总体蒸散强度增大。在旱季由于橡胶林生物活动微弱,蒸腾相应减弱;且旱季降水量少,蒸发量减少,蒸腾量成为影响蒸散的主要成分,而影响蒸腾的环境因素比影响蒸发的要更为复杂,旱季气候条件不稳定,导致

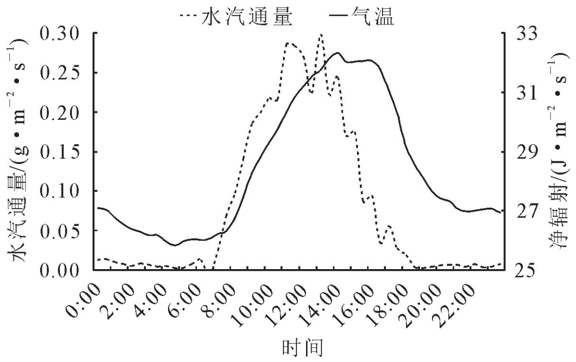

图 6　生长季橡胶林水汽通量和气温的典型日变化曲线

Fig. 6　Diurnal change of water vapor flux and air temperature during growth season

曲线相对不平滑,且水汽通量较小,但总体依然表现为水汽源。

3.2　橡胶林生态系统蒸散量与降雨量特征

2017、2018 年度总降水量分别为 1 687.6、2 264.7 mm,蒸散总量为 962.24、1 209.29 mm,分别占全年降水的 57.02%、53.40%;属于森林生态系统蒸散率的合理范围[29]。对比不同森林生态系统,海南儋州橡胶林生态系统的全年蒸散水平高于千烟州人工针叶林[18]、太湖源雷竹林[30]、安吉毛竹林[24]、北京杨树人工林[25]、湖南会同杉木人工林[31]等亚热带森林生态系统,也高于 H. R. Darocha 等[32]和 Y. Malhi 等[33]分别在亚马逊热带雨林测得的蒸散数据(1 300 mm 和 1 123 mm),但与其蒸散占年降雨的比例相差不大(60%和 54%)。

蒸散量主要集中在 5—10 月,约占全年蒸散量的 78%,最大值出现在 7 月(194.87 mm),且雨季降雨远大于蒸散。旱季蒸散量与降雨量基本持平或略大于降雨,与其他林种的蒸散研究对比结果相似,说明在旱季有缺水情况但并不严重,与张晓娟等[26]的研究结果略有差异。因此旱季的胶林生长受到一定降水不足的胁迫,但并不显著。

由于涡度相关法的预设前提是在生态系统能量收支闭合(energy balance closure)的基础上,但实际测定潜热和显热总量比常规测定的净辐射输入量小[34],因此估算结果一般略低于实际蒸散量[26]。另外,环境因子如降雨、露水等也会导致观测结果出现误差,对原始数据的检验和修正等操作同样可能导致蒸散量估算结果偏低。

3.3　环境因子对水汽通量的影响

水汽通量对环境因子的响应随季节变化而发生变化,全年净辐射对水汽通量变化产生持续稳定的影响,且一直呈极显著相关。旱季时土壤水分、土壤热通量和风速是影响水汽通量的主要因子,且均呈负相关,是胁迫水汽通量的因子;雨季时则受饱和水

汽压差和空气温度影响更大。说明旱季影响水汽通量主要因素在土壤层面，而雨季则是大气层面。

净辐射和气温是蒸散发生的先决条件，是水汽循环最主要驱动力。海南橡胶林水汽通量与净辐射和气温均呈正相关，且雨季相关性高于旱季。但水汽通量随净辐射强度增大，水汽通量的增长速度减缓；而气温相反，温度越高水汽通量增长速度越快。因为净辐射增大到一定值，植物叶片气孔关闭，蒸腾量减小，进而水汽通量减小；而气温越高，水分传输过程越活跃，则水汽通量增速越大。对水汽通量与二者进行回归分析得，雨季相关性最好，其中，雨季(5－10 月)相关性最好，其次是 1－4 月，最差的是 11－12 月，则雨季净辐射和气温对水汽通量的影响更为显著。因为雨季是橡胶林的生长季，此时生命活动旺盛，叶面积大，植物叶片蒸腾作用强；且雨季气温高于旱季，促使水分蒸发和植物蒸腾过程更加剧烈。旱季的相关性差，从生物因素来看，橡胶林在儋州等较为寒冷地区表现为落叶树种，雨季的 12 月至翌年 2 月老叶大量脱落，且温度、光照都不足，在旱季生物活动明显减弱，影响了植物蒸腾；从非生物因素来看，旱季气候多变，常冷热交替，环境因子不稳定。两方面结合，整体上影响水汽通量变化的不稳定因素变多，导致与净辐射和气温的相关性较差。

橡胶林生态系统总体表现为水汽源，蒸散水平属热带森林的平均范围内，年蒸散率约为 55.21%。通过对比可以看出，虽然人工橡胶林的总体蒸散水平高于西双版纳甚至亚马逊热带雨林，但橡胶林的年蒸散总量依然小于年降水量，只是在旱雨季中水分分配比例不同，雨季降雨远远大于蒸散，旱季时降雨略小于蒸散或基本持平。因此从全年尺度来看，蒸散量占降水量的比例处于正常水平，2018 年的年蒸散率甚至小于太湖源雷竹林、千烟洲人工针叶林等亚热带森林生态系统[18,30]。因此在海南儋州地区开展的本研究结果与 Z. H. Tan *et al*[35] 认为橡胶林是中国热带地区水泵的结果不同，本研究认为在年周期内不存在橡胶树抽取大量地下水并交换到大气的现象。

植胶区的地下水位降低、当地水资源短缺等现象，不能简单地归因于橡胶林的生理机制和生长过程，而更应该考虑土壤性质、气候转变、地下水的不合理使用以及地下水来源减少等其他可能因素。另外在不同时间尺度上看，旱季降水量极少，此时蒸散量大于降水量，因此在 1－3 月内确实可能出现短期的植胶区地下水位降低的现象，但这并不能证明橡胶林的生长会对当地水文生态造成破坏，应当从更长的时间尺度和更全面的角度得出合理结论。橡胶林是高产出、高效益的行业，能为人类社会做出巨大贡献的行业；发展橡胶产业是人类开发利用自然资源的一种方式，它会产生强大的经济、生态和社会服务功能价值[36]。因此橡胶种植园在环境友好的前提下，应该得到更加有效的经营和发展。

参考文献：

[1] 余新晓，史宇，王贺年，等. 森林生态系统水文过程与功能[M]. 北京：科学出版社，2013：1-3.

[2] 于贵瑞，孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京：高等教育出版社，2008：34-35.

[3] CHOUDHURY B J，DIGIROLAMO N E，SUSSKIND J，*et al*. A biophysical process-based estimate of global land surface evaporation using satellite and ancillary data Ⅱ. Regional and global patterns of seasonal and annual variations[J]. Journal of Hydrology，1998，205(3/4)：186-204.

[4] CONSTATIN J，INCLAN M G，RASCHENDORFER M，*et al*. The energy budget of a spruce forest：field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME)[J]. Journal of Hydrology，1998，212-213：22-35.

[5] WANG A Z，PEI T F. Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2001，12(6)：933-937.

[6] OLIVIER R，JEAN MB，MARK I，*et al*. Partitioning energy and evapotranspiration above and below a tropical palm canopy [J]. Agricultural and Forest Meteorology，2006，139：252-268.

[7] FERRETTI D F，PENDAL E，MORGAN J A，*et al*. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes：seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO_2[J]. Plant and Soil，2003，254，291-303.

[8] LAW B E，FALGE E，GU L，BALDOCCHI D D，*et al*. Environmental controls over carbon dioxide and vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology，2002，113：97-120.

[9] 刘晨峰，张志强，查同刚，等. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响[J]. 生态学报，2006，26(8)：2549-2557.
LIU C F，ZHANG Z Q，ZHA T G，*et al*. Soil moisture affects energy allocation and diurnal evapotranspiration of a poplar plantation-an eddy-covariance-based study[J]. Acta Ecologica Sinica，2006，26(8)：2549-2557. (in Chinese)

[10] 宋霞，刘允芬，徐小锋，等. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析[J]. 资源科学，2004，26(3)：96-104.
SONG X，LIU Y F，XU X F，*et al*. Comparison study on carbon dioxide，water and heat fluxes of the forest ecosystem in red earth hilly zone over winter and spring[J]. Resources Science，2004，26(3)：96-104. (in Chinese)

[11] 张学仕. 次生栎林蒸散量与水分利用效率研究[D]. 南京：南京林业大学，2010.

[12] 吴志祥，谢贵水，陶忠良. 中国天然橡胶可持续发展思路探讨[J]. 世界农业，2009(2)：47-49.

[13] 吴志祥，谢贵水，杨川，等. 橡胶林生态系统干季微气候特征和通量的初步观测[J]. 热带作物学报，2010，31(12)：2081-2090.

WU Z X,XIE G S,YANG C,*et al*. Characteristics of microclimate and flux of a rubber plantation ecosystem in dry season of Hainan Island,south China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2010,31(12):2081-2090.(in Chinese)

[14] 陈莉,黄先寒,兰国玉,等.中国橡胶林下植物物种组成与多样性分析[J].西北林学院学报,2019,34(2):76-83.
CHEN L,HUANG X H,LAN G Y,*et al*. Undergrowth plant species composition and diversity of rubber plantations in China[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(2):76-83.(in Chinese)

[15] WILSON K B,ALLEN G,EVA F,*et al*. Energy balance closure at flux net sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2002,113:223-243.

[16] BURBA G. Eddy covariance method[J]. Li-COR Bio geosciences,Lincoln,NE,2013(9/11):19-20.

[17] GOULDEN M L,MUNGER J W,FAN S M,*et al*. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy[J]. Global Change Biology,1996,2(3):169-182.

[18] 李菊,刘允芬,杨晓光,等.千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2006,26(8):2449-2456.

[19] AUBINET M,GRELLE A,IBROM A,*et al*. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests:the EUROFLUX methodology[J]. Advances in Ecological Research,2000,30:113-175.

[20] 徐自为,刘绍民,徐同仁,等.涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较[J].地球科学进展,2009,24(4):373-382.
XU Z W,LIU S M,XU T R,*et al*. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system[J]. Advances in Earth Science,2009,24(4):373-382.(in Chinese)

[21] FALGE E,BALDOCCHI D D,OLSON R,*et al*. Gap filling strategies for long term energy flux date set,a short communication[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2001,107(1):71-77.

[22] FALGE E R,BALDOCCHI D,OLSON R,*et al*. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2001,107(1):43-69.

[23] BALDOCCHI D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates ofecosystems: past,present and future[J]. Global Change Biology,2003,9(4):479-492.

[24] 刘玉莉,江洪,周国模,等.安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2014,34(17):4902-4909.
LIU Y L,JIANG H,ZHOU G M,*et al*. Water vapor flux variation characteristic and the relationship with its environment factors in phyllostachys edulis forest in Anji[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(17):4900-4909.(in Chinese)

[25] 刘晨峰,张志强,孙阁,等.基于涡度相关法和树干液流法评价杨树人工林生态系统蒸发散及其环境响应[J].植物生态学报,2009,33(4):706-718.
LIU C F,ZHANG Z Q,SUN G,*et al*. Quantifying evapotranspiration and biophysical regulations of a poplar plantation assessed by eddy covariance and sap-flow methods[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2009,33(4):706-718.(in Chinese)

[26] 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):1432-1439.
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):1432-1439.(in Chinese)

[27] JI X B,KANG E S,ZHAO W Z,*et al*. Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the Oases of the Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2004,26(6):713-719

[28] 黄振英,董学军,蒋高明,等.沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究[J].西北植物学报,2002,22(4):817-823.
HUANG Z Y,DONG X J,JIANG G M,*et al*. Primary studies on the daily dynamic changes of photo-synthesis and transpiration of *Salix psammophila*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2002,22(4):817-823.(in Chinese)

[29] 刘世荣,温远光,王兵,等.中国森林生态系统水文生态功能规律[M].北京:中国林业出版社,1996:17-103.

[30] 蔺恩杰,江洪,陈云飞.太湖源雷竹林水汽通量变化及其对净辐射的响应[J].浙江农林大学学报,2013,30(3):313-318.
LIN E J,JIANG H,CHEN Y F. Water vapor flux variation and net radiation for a *Phyllostachys violascens* stand in Taihuyuan[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2013,30(3):313-318.(in Chinese)

[31] 赵梅芳,项文化,田大伦,等.基于3-PG模型的湖南会同杉木人工林蒸发散估算[J].湖南农业科学,2008(3):158-162.

[32] DAROCHA H R,GOULDEN M L,MILLER S D,*et al*. Seasonality of water and heat fluxesovera tropical forest in eastern Amazonia[J]. Ecological Applications,2004,14(4):22-32.

[33] MALHI Y,PEGORARO E,NOBRE A D,*et al*. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest[J/OL]. Journal of Geophysical Research,2002,107(D20):LBA45-1-17. https://agupubs. onlinelibrary. wiley. com/doi/abs/10.1029/2001JD000623

[34] WILSON K,GOLDSTEIN A,FLAGE E,*et al*. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agriculture and Forest Meteorology,2002,113:223-243.

[35] 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):1-3.

[36] 陈伟,兰国玉,蒋菊生,等.海南农垦橡胶林生态系统服务价值的分析[J].西北林学院学报,2008,23(1):215-218.
CHEN W,LAN G Y,JIANG J S,*et al*. Evaluation of the rubber forest ecosystem service function of Hainan state farm bureau(HSFB)[J]. Journalof Northwest Forestry University,2008,23(1):215-218.(in Chinese)