



重庆缙云山针阔混交林水汽通量特征及其影响因子

冯印成¹ 王云琦^{1*} 王玉杰¹ 王 凯¹ 王松年¹ 王杰帅²

¹北京林业大学重庆缙云山三峡库区森林生态系统定位观测研究站, 水土保持学院, 北京 100083; ²苏州高新区林业站, 江苏苏州 215011

摘 要 利用涡度相关技术于2019年9月–2020年8月在重庆缙云山针阔混交林生态系统观测了水汽通量和其他环境要素。基于观测数据, 分析了水汽通量特征及其与环境因子的关系。结果表明: (1)针阔混交林生态系统能量闭合率为0.77, 且通量足迹高贡献区域所处方向与风玫瑰图的全年主风方向(东北风向)一致, 累计通量贡献区变异系数比较小, 证明涡度相关技术在研究区适用性较好, 数据可靠。(2)缙云山针阔混交林的全年水汽通量基本为正值, 月平均日变化范围为–0.001–6.623 mmol·m⁻²·s⁻¹, 说明研究区为水汽源。水汽通量月平均日变化和季节变化均为单峰趋势。夏季水汽通量平均值最大(4.620 mmol·m⁻²·s⁻¹), 变化趋势强; 冬季水汽通量值最低(2.077 mmol·m⁻²·s⁻¹), 变化趋势弱。(3)该地区全年蒸散总量(792.40 mm)占降水总量(1 489.18 mm)的53.12%, 夏季的蒸散量(325.53 mm)和降水量(680.52 mm)最高, 分别占到全年蒸散量和降水量的41%和46%。缙云山针阔混交林生态系统站点与其他地区不同生态系统站点对比, 得出全年蒸散量为湿地>森林>农田。(4)净辐射、气温、饱和水汽压差和风速对水汽通量的影响在各季节均显著, 净辐射、气温和饱和水汽压差与水汽通量呈正相关关系, R^2 最大分别为0.85、0.53和0.60, 风速与水汽通量呈负相关关系, R^2 为0.61, 均是夏季的相关性最高, 其中净辐射和气温是影响水汽通量的最主要因子。

关键词 针阔混交林; 水汽通量; 涡度相关; 蒸散; 净辐射

冯印成, 王云琦, 王玉杰, 王凯, 王松年, 王杰帅 (2022). 重庆缙云山针阔混交林水汽通量特征及其影响因子. 植物生态学报, 46, 890-903. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0363

Water vapor fluxes and their relationship with environmental factors in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, China

FENG Yin-Cheng¹, WANG Yun-Qi^{1*}, WANG Yu-Jie¹, WANG Kai¹, WANG Song-Nian¹, and WANG Jie-Shuai²

¹Chongqing Jinyun Mountain Three Gorges Reservoir Area Forest Ecosystem Positioning Observation and Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and ²Forestry Station of Suzhou High Tech Zone, Suzhou, Jiangsu 215011, China

Abstract

Aims This study aimed to examine the practicability of eddy covariance method in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain of Chongqing, China, and to analyze the dynamics of water vapor flux in this forest ecosystem. Meanwhile, the main environmental factors that influence water vapor flux was also discussed. Our results may provide a case for such study in forest water vapor budget.

Methods The eddy covariance method was used to continuously observe the vapor fluxes and meteorological factors from September 2019 to August 2020 in a conifer-broadleaf mixed forest. The original data of water vapor flux was corrected and interpolated by Eddy Pro software. We used these data to analyze the energy closure and variation of water vapor fluxes, and as well as environmental factors.

Important findings (1) The energy closure rate in our study forest is 0.77. The direction of the high contribution area of flux footprints in such forest is similar to the annual main wind direction (northeast), indicating that the method of vorticity related technology is practicable and reliable in this kind of forest. (2) In our study forest, the annual water vapor flux is over zero, and the monthly average daily variation is –0.001–6.623 mmol·m⁻²·s⁻¹, suggesting that this forest is a source of water vapor in study area. There is a single peak trends for monthly average daily variation and seasonal variation of water vapor fluxes. By contrast, the average value of water vapor fluxes is the highest (4.620 mmol·m⁻²·s⁻¹) in summer with strong fluctuations, and the lowest (2.077 mmol·m⁻²·s⁻¹) in winter with weak fluctuations. (3) The total annual evapotranspiration (792.40 mm) in this forest accounts for 53.12% of the total precipitation (1 489.18 mm), and the summer evapotranspiration (325.53 mm) and precipitation

收稿日期Received: 2021-10-12 接受日期Accepted: 2022-03-21

基金项目: 国家林业局重点林业科学技术研究项目(2017-02)。Supported by the Forestry Science and Technology Research Project of the State Forestry Administration of China (2017-02).

* 通信作者Corresponding author (wangyunqi@bjfu.edu.cn)

(680.52 mm) are the highest, accounting for the annual evapotranspiration and precipitation respectively 41% and 46%. Compared with other ecosystem sites, we found that total annual evapotranspiration was less in our study forest than in wetland, but more than in farmland and grassland. (4) The water vapor flux was positively correlated with net radiation, air temperature and vapor pressure deficit. Such correlations (R^2) were the highest in summer, and reached to 0.85, 0.53 and 0.60, respectively. Conversely, the water vapor flux was negatively correlated with wind speed, and the R^2 equal to 0.61 in the summer. It seems likely that net radiation and air temperature are the main drivers in water circulating at our study forest.

Key words conifer-broadleaf mixed forest; water vapor flux; eddy correlation; evapotranspiration; net radiation

Feng YC, Wang YQ, Wang YJ, Wang K, Wang SN, Wang JS (2022). Water vapor fluxes and their relationship with environmental factors in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 46, 890-903. DOI: 10.17521/cjpe.2021.0363

水与水循环在森林生态系统中发挥着至关重要的作用(李菊等, 2006; 卢琼等, 2020)。水循环驱动着森林中的能量流动与物质循环(李玉山, 2001; 刘玉莉等, 2014; 张晓娟等, 2015; Jung, 2021), 因此水与水循环一直被广泛关注。森林生态系统中参与水循环的一个关键参数是水汽通量(Jung, 2021), 其是森林中潜热传导的载体, 起到了维持森林中水量平衡的作用(刘辉志等, 2006; 牛晓栋等, 2016)。森林中水汽通量主要是指林内地表土壤的水分蒸发、林内植被的蒸腾以及林内植被茎干截流蒸发的总和(刘玉莉等, 2014; 牛晓栋等, 2016; 翁闻畅等, 2020)。针阔混交林是陆地上最为广泛和重要的生态系统(黄钰辉等, 2017), 而水汽通量又是研究森林植被水量平衡的重要指标、生态系统能量闭合的影响因素、影响研究区气候的重要因子(徐少君等, 2012)。

涡度相关技术(吴家兵等, 2005; Allen *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2021)是一种可以长期连续地对地表和大气间的 CO_2 、 H_2O 和热量通量进行观测的微气象技术。由于该技术对生态系统的干扰性小, 观测数据准确, 所以已经成为国际通量观测网(FLUXNET)的标准方法(尹茜茜等, 2020; Zhang & Yuan, 2020)。中国也利用涡度相关技术建设了中国陆地生态系统通量观测网(ChinaFLUX)(李正泉等, 2004; 于贵瑞等, 2014)进行观测研究。全国建立了多个基于涡度相关技术的通量观测站点(Yu *et al.*, 2016), 其中很大部分都是对碳通量(王倩等, 2019)和能量通量的观测研究, 关于针阔混交林生态系统水汽通量较少有深入讨论和研究(Rannik *et al.*, 2002; 李菊等, 2006; 翁闻畅等, 2020)。

本研究以重庆市缙云山国家级定位观测研究站内的典型针阔混交林生态系统为研究对象。该地区具有中亚热带季风湿润性气候特征。利用2019–2020

年在通量塔观测的水汽通量数据, 我们对该生态系统的能量闭合与贡献足迹进行分析, 探究了涡度相关法对该研究区的适用性, 并且对水汽通量的变化特征及环境因子进行分析, 为研究针阔混交林生态系统的水量收支平衡、气候变化提供数据支撑, 同时给当地森林生态可持续经营管理提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆北碚区嘉陵江旁的缙云山森林生态系统观测研究站内(106.28°E – 106.40°E , 29.68°N – 29.87°N), 占地面积 76 km^2 。年降水量约为 $1\,611.8\text{ mm}$, 年蒸发量约为 777.1 mm , 年平均气温 13.6°C , 年日照时间比较低, 为 $1\,293\text{ h}$, 地属中亚热带季风性气候。一年当中平均有89天属于雾天(张璇, 2019), 降水主要集中在5–10月, 占年降水量的80%以上。其中最热月份为7–8月, 最高气温一般超过 35°C , 蒸腾量大, 降水量比较少; 冬季降水明显较少, 1月为最冷月份, 平均气温 3.1°C 。自然植被类型以常绿阔叶林、针阔混交林、暖性针叶林、竹林为主, 其中研究区样地为针阔混交林, 植被种类丰富, 主要为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、四川山矾(*Symplocos setchuensis*)等。

1.2 通量塔仪器配置

通量观测塔位于研究区样地西北侧大概 50 m , 塔高 35 m , 分为上下两层, 均安装有相应观测仪器。主要包括开路式涡度监测系统和微气象观测系统两部分。开路式涡度监测系统安装在通量塔 33 m 处, 主要仪器包括: 开路红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪 Li-7500 (LI-COR, Lincoln, USA)和三维超声风速仪 CAST-3 (Gill, Lymington, UK), 仪器采样频率为10

Hz, 数据采集器CR3000 (Campbell, Logan, USA), 采集数据时储存并计算30 min通量数据平均值。

微气象观测系统主要仪器包括: 安装于通量塔25 m和33 m处的大气温湿度传感器HMP60 (Vaisala, Helsinki, Finland), 翻斗式雨量计TR-525M (Campbell, Logan, USA), 光合有效辐射传感器LI-190SB (LI-COR, Lincoln, USA), 35 m处还安装有净辐射仪NR01 (Hukseflux, Delft, the Netherlands)、风速风向仪03002 (RM Young, Traverse, USA)。微气象观测系统仪器采样频率也为10 Hz, 使用前均进行了标定, 利用数据采集器CR3000储存并计算温度、降水量、净辐射和风速等气象因子的30 min平均值。

1.3 计算公式

涡度相关法是目前对陆地生态系统与大气间物质与能量交换进行直接观测的通用标准方法。主要是通过测定大气中湍流运动产生的风速脉动和物理量脉动的协方差来测定物质或能量的通量。其中水汽通量计算公式(李菊等, 2006)为:

$$E = \overline{\rho q' \omega'} \quad (1)$$

式中, E ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)代表水汽通量, ρ 为干空气密度, q 为比湿, ω 为垂直风速; 上划线代表一定时段的平均; 撇号表示脉动。规定若水汽从大气进入生态系统, 则值为负; 若气体从生态系统进入大气, 则值为正(李菊等, 2006)。

能量闭合能检验生态系统中输出的能量与输入的能量是否一致, 是反映仪器和环境状况的一个指标(阳坤和王介民, 2008)。森林中能量输入有太阳净辐射(R_n)、显热通量(H)、潜热通量(LE)、地表土壤热通量(G)、冠层储热(F_s)和其他能量输出项(Q)。森林生态系统中的能量闭合计算公式(张璇, 2019)为:

$$R_n - G = H + LE + F_s + Q \quad (2)$$

由于森林生态系统中 F_s 和 Q 所占比例很少, 且部分数据获取难度较大, 所以主要用潜热和显热通量之和($LE + H$)与对应的可用能量通量($R_n - G$)来计算能量闭合。

1.4 数据处理

数据处理采用Eddy Pro 7.1.6软件对10 Hz的30 min平均值通量原始数据进行处理。

坐标旋转校正, 由于研究区地形复杂属于森林山地, 所以2次和3次坐标旋转不能满足该研究区对垂直风速的要求, 因此采用平面拟合法进行校正

(Wilson *et al.*, 2002)。

本研究中摩擦风速(u^*)的临界值无法固定, 而是利用Moving Point Test动态估计的(Papale *et al.*, 2006)。

通量数值校正, 主要是WPL校正、频率响应校正、夜间通量校正。

数据插补, 采用由Max Planck Institute for Biogeochemistry开发的REddyProcWeb在线数据处理工具对不连续的通量数据进行插补(徐自为等, 2009), 并采用Giacomo和Kljun (Kljun *et al.*, 2015)的方法在Tovi软件进行通量足迹预测。

数据分析和制图均基于SPSS 20.0、MATLAB、Tovi和Excel 2013软件完成。

2 结果和分析

2.1 能量闭合与通量足迹分析

2.1.1 能量闭合分析

以2019–2020年针阔混交林生长季观测到的30 min能量通量数据为基础, 按照日平均值计算得到针阔混交林生态系统的能量闭合率为0.77 ($R^2 = 0.54$) (图1), 在以往对研究山区林地涡度相关系统的能量闭合范围之内(0.70–0.90)(Wilson *et al.*, 2002; Kumagai *et al.*, 2005), 表明该研究区能量闭合状况良好。

2.1.2 通量足迹分析

通过涡度协方差数据分析软件(Tovi)对2019–2020年观测到的逐日30 min通量数据按照季节尺度进行处理分析, 得到春季(3–5月)、夏季(6–8月)、秋季(9–11月)和冬季(12–2月)通量足迹图(图2)。

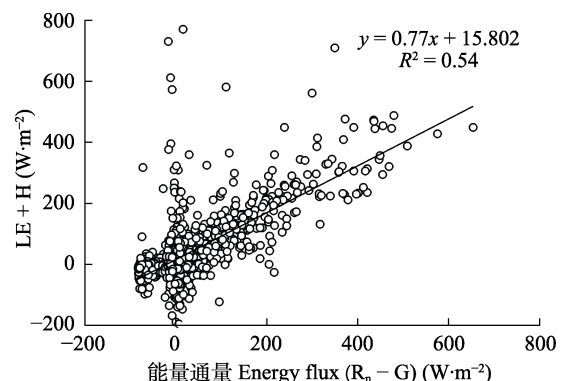


图1 重庆缙云山针阔混交林生态系统的能量闭合状况分析。 G , 地表土壤热通量; H , 显热通量; LE , 潜热通量; R_n , 太阳净辐射。

Fig. 1 Energy closure analysis in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem at our study site in Jinyun Mountain, Chongqing. G , soil heat flux; H , sensible heat flux; LE , latent heat flux; R_n , net radiation.

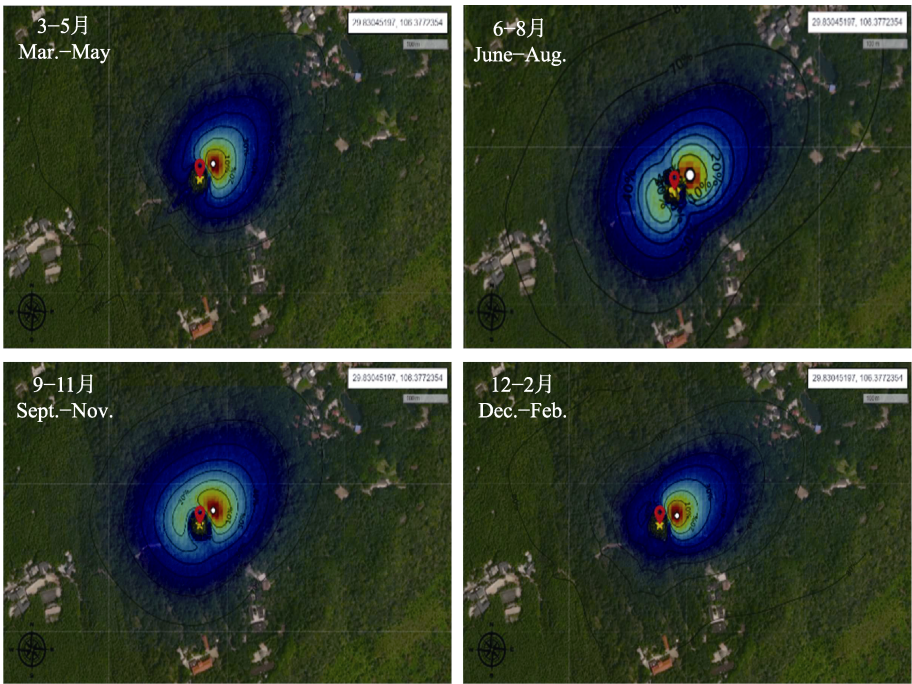


图2 2019–2020年重庆缙云山针阔混交林生态系统季节尺度的通量足迹图。
Fig. 2 Footprints of energy fluxes in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, at four seasons during study period (2019–2020).

图中有色区域为通量贡献区, 其中红色代表通量数据采集最密集的区域, 为通量主要贡献区, 闭合线圈代表累计通量数据贡献区的范围, 图2中各季节通量数据贡献区基本集中在东北侧。夏季和秋季的高亮区域在西南-东北方向都能观测到通量足迹, 这是因为此时段风向波动较大, 通量数据贡献区范围变化较大; 而其他季节高亮区域主要集中在东北侧, 风向比较稳定, 通量数据贡献区范围变化较小。对全年风速风向变化进行的分析(图3)显示, 全年主风向以东北风向为主, 这与季节通量数据高贡献区方向相吻合。说明研究区数据来源可信。

表1列出了通量数据贡献区平均距离, 该研究区通量数据贡献峰值距离通量塔平均82.21 m, 变异系数(CV)为2.38%。其中10%、30%、50%、70%和90%累计贡献区距离通量塔分别为27.37、69.58、110.50、153.90和229.63 m, CV分别为6.42%、3.68%、1.86%、1.42%和1.65%。90%累计贡献区距离最大, 10%累计贡献区距离最小, 贡献区距离均在正常范围内, 且不同月份间相差不大。

2.2 全年水汽通量各月日平均值变化特征

利用针阔混交林2019–2020年水汽通量数据得到逐日30 min的水汽通量数据, 在此基础上计算了逐月的水汽通量的平均日变化趋势(图4), 可以看出水汽通量基本为正值, 说明水汽由生态系统输向大

气, 即缙云山针阔混交林是一个水汽源。总体日变化趋势曲线呈单峰形, 凌晨和夜间水汽流通量值稳定, 基本接近于0, 1、2、11和12月比较明显。从7:00–8:00水汽通量值上升, 12:00–14:00达到一天内的

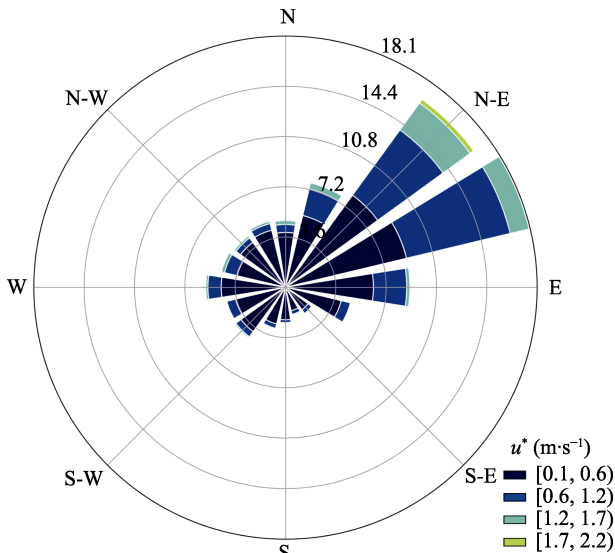


图3 重庆缙云山针阔混交林生态系统的全年风玫瑰图。N、E、S、W代表北方、东方、南方、西方4个方向。各圆环数值为某风向出现的次数占全年总观测次数的百分比(%)。u*, 摩擦风速。
Fig. 3 Wind rose diagram in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing. N, E, S, W is north, east, south and west. The value of each circle is the percentage (%) of the number of occurrences of a certain wind direction in the total number of observations throughout the year. u*, friction wind speed.

表1 重庆缙云山针阔混交林生态系统通量贡献区距离

Table 1 Distance between observation station and peak flux contribution in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing

月份 Month	通量贡献峰值距离 x_peak (m)	10% 累积通量贡献的 上风向距离 x_10% (m)	30% 累积通量贡献的 上风向距离 x_30% (m)	50% 累积通量贡献的 上风向距离 x_50% (m)	70% 累积通量贡献的 上风向距离 x_70% (m)	90% 累积通量贡献的 上风向距离 x_90% (m)
1	79.40	24.45	66.90	110.25	149.57	229.57
2	79.57	24.92	69.06	110.64	152.73	228.86
3	84.63	29.05	72.34	110.32	154.73	231.81
4	83.44	28.64	71.32	108.77	152.55	228.55
5	85.51	29.35	73.10	111.48	156.35	224.24
6	80.69	27.70	68.97	105.19	151.53	229.02
7	84.39	28.97	72.14	110.01	154.30	231.16
8	83.02	29.87	69.39	113.44	155.11	238.37
9	82.44	27.27	67.91	113.56	155.25	227.61
10	82.01	25.72	69.55	110.87	151.65	229.24
11	81.29	26.50	63.50	110.85	155.83	223.50
12	80.12	26.01	70.80	110.58	157.22	233.62
平均值 Average	82.21	27.37	69.58	110.50	153.90	229.63
变异系数 CV (%)	2.38	6.42	3.68	1.86	1.42	1.65

CV, coefficient of variation; x_, upwind distance of cumulative flux contribution; x_peak, peak distance of flux contribution.

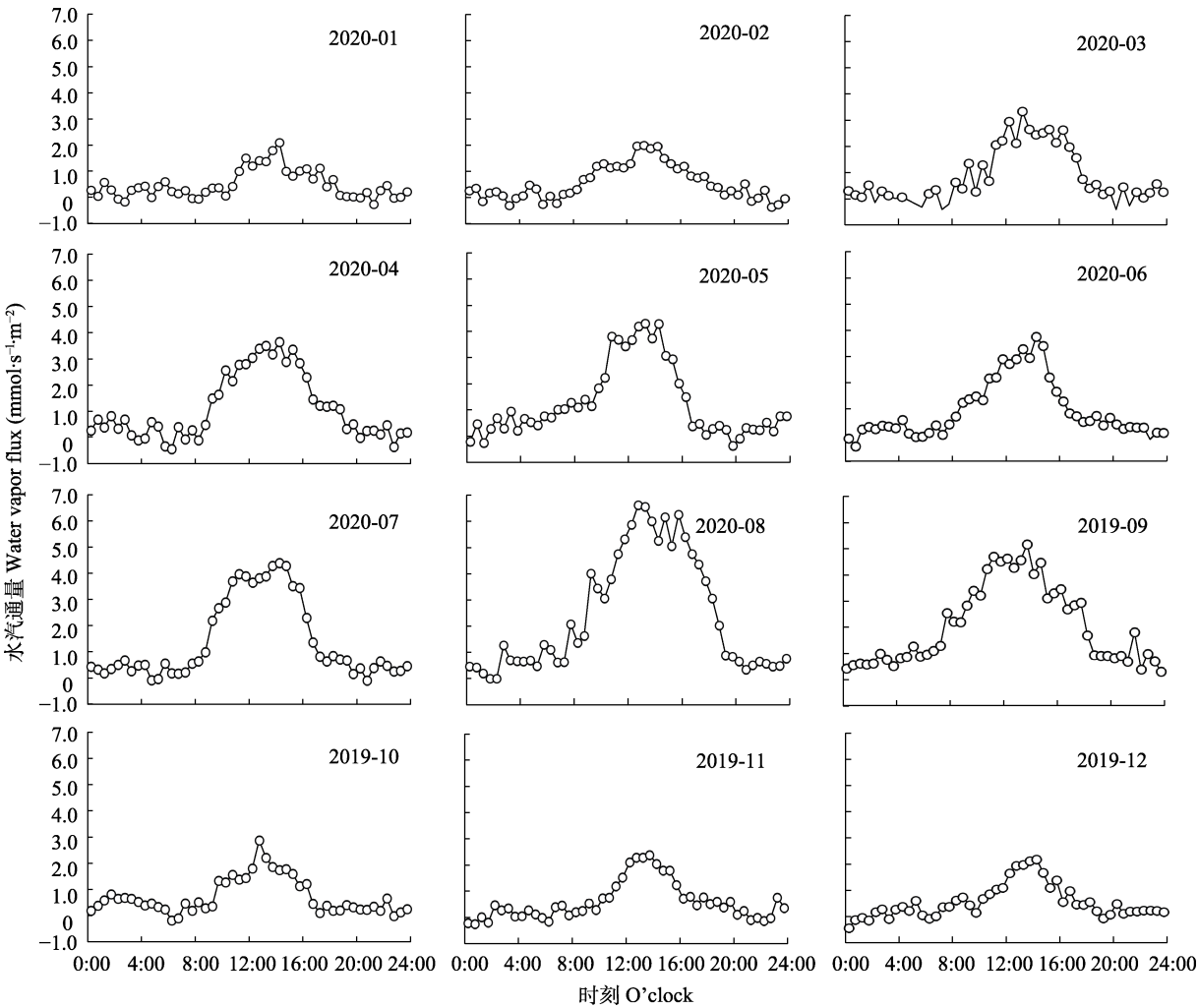


图4 2019–2020年重庆缙云山针阔混交林生态系统的各月水汽通量日平均值变化分布。
Fig. 4 Mean diurnal changes of monthly water vapor fluxes in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, during study period (2019–2020).

峰值, 6、7、8月比较明显, 一些月份还存在双峰变化趋势, 紧接着水汽通量逐渐下降, 18:00–19:00水汽通量值逐渐趋近于0, 之后数值浮动基本保持平稳。各月水汽通量最大值在 $1.960\text{--}6.623\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 且不同的季节月份差异明显, 植被蒸散时间基本集中在7:00–19:00之间。8月的平均水汽通量值最大($6.623\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 2月的平均水汽通量值最小($1.960\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。各月水汽通量最小值在 $-0.001\text{--}0.623\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 基本出现在凌晨或夜间。8月的平均水汽通量值($0.623\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)高于其他月份, 12月平均水汽通量值($-0.001\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)低于其他月份。

2.3 全年水汽通量季节变化特征

对缙云山针阔混交林的水汽通量数据按照季节尺度分析变化趋势(图5)。从图5中可以看出缙云山针阔混交林水汽通量季节尺度的日变化趋势明显并呈单峰曲线。其中夏季的水汽通量变化规律性较强, 夏季平均水汽通量峰值为 $4.620\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中最大值出现在14:00左右, 有双峰变化趋势; 春季和秋季水汽通量变化趋势相似, 春季平均水汽通量峰值为 $3.713\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 秋季平均水汽通量峰值为 $3.151\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 且春季的白天水汽通量曲线波动较多; 冬季水汽通量日变化趋势最低, 平均水汽通量峰值为 $2.077\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 全年水汽通量受季节变化影响比较大, 不同季节平均水汽通量峰值排列: 夏季>春季>秋季>冬季。水汽输送时长为夏季(13.5 h)>春季(12 h)>秋季(11.5 h)>冬季(10 h)。夏季雨水较多, 植物生长旺盛, 地表蒸发和植被蒸腾都比较多, 所以平均水汽通量值大于其他季节。

2.4 降水量和蒸散量的特征

根据2019年9月到2020年8月缙云山针阔混交林各月的降水量, 计算各月蒸散量总和。从图6中可以看出, 针阔混交林生态系统各月蒸散量变化有单峰趋势, 与气温季节变化相符合。1、3、4、9和12月的蒸散量与降水量相差不多, 个别月份降水量低于蒸散量, 1月份的降水量(21.45 mm)和蒸散量(32.12 mm)都最低, 2月的降水量比蒸散量高, 因为降水增大了空气和土壤湿度, 降低了温度, 所以蒸散量较低。5月开始进入雨季, 降水量最大(285.23 mm), 蒸散量也比较高, 5–8月降水量远大于其他月份。7月蒸散量最高(118.98 mm), 降水多的月份蒸散量也比较高。

结合表2得出降水量与蒸散量受季节影响明显, 缙云山针阔混交林各季节降水量对比表现为夏季>春季>秋季>冬季; 夏季降水量最高(680.52 mm), 占全年总降水量($1\,489.18\text{ mm}$)的46%, 其次就是春季, 降水量 419.57 mm , 占全年降水量的28%; 秋季和冬季降水量分别是 254.38 和 134.71 mm , 占全年降水量的17%和9%。各季节蒸散量表现为夏季>春季>秋季>冬季; 夏天蒸散量最大(325.53 mm), 占全年蒸散量(792.40 mm)的41%, 因为处于雨季, 降水量较多, 蒸散量也比较高; 春季和秋季蒸散量分别是 230.96 和 137.77 mm , 占全年蒸散量的29%和17%; 冬季的蒸散量最小(98.14 mm), 占全年蒸散量的13%。下文将综合几个相近纬度不同生态系统的蒸散量与降水量进行对比, 并在讨论中展开说明。

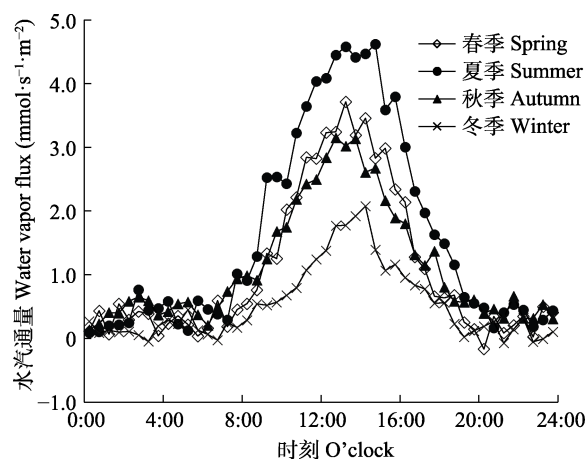


图5 2019–2020年重庆缙云山针阔混交林生态系统的水汽通量各季节平均日变化特征。

Fig. 5 Mean diurnal changes of quarterly water vapor fluxes in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, during study period (2019–2020).

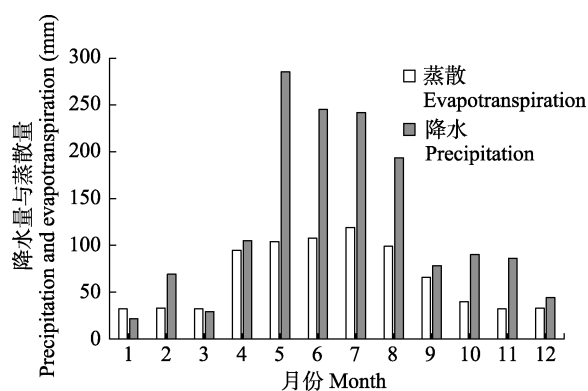


图6 2019–2020年重庆缙云山针阔混交林生态系统的降水量和蒸散量的对比。

Fig. 6 Contrasts between precipitation and evapotranspiration in a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing, during study period (2019–2020).

2.5 环境因子对针阔混交林水汽通量的影响

2.5.1 净辐射与水汽通量

R_n 是影响水汽通量变化的主要环境因子,按照季节尺度对缙云山针阔混交林生态系统水汽通量与 R_n 的相关性进行了分析(图7)。通过分析发现,水汽通量与 R_n 成正相关关系,且不同季节相关性也有所不同。其中,夏季的水汽通量与 R_n 的相关性最佳, R^2 为0.85;其次是春季, R^2 为0.73;秋季和冬季的水汽通量与 R_n 相应均较低, R^2 分别为0.23和0.14。夏季的水汽通量与 R_n 相关性高于其他季节,是因为植物正处于生长季,植物生理和化学活动旺盛,叶面积指数大,植物叶片蒸腾比较强。另外,夏季降水量充足, R_n 高会导致气温升高,促进地表水分蒸发。冬季相关性低的原因是冬季的水汽通量普遍偏低, R_n 与气温也低,降水量少,植物的蒸腾量与地表水分蒸发量也比较少。

2.5.2 气温与水汽通量

不同季节气温有所不同,气温直接受辐射影响,

气温升高可以促进植物叶片蒸腾量和地表水分蒸发量。另外气温变化可以间接影响其他环境因子,对水汽传输造成影响,从而影响水汽通量的变化(李菊等, 2006)。所以气温和水汽通量的相关关系与 R_n 相似。利用2019年9月到2020年8月水汽通量数据,按照季节尺度与气温进行相关性拟合分析(图8)。结果显示,缙云山针阔混交林生态系统的水汽通量与气温呈正相关关系。夏季的 R^2 最高(0.60),其次是秋季(0.45)和春季(0.44),两季的相关性基本一致,冬季的水汽通量与气温相关性较差, R^2 为0.25。夏季的水汽通量与气温相关性最好,因为夏季气温高使植物叶片蒸腾量和地表水分蒸发量增加,水汽通量值较大。春季和秋季气温要低于夏季且昼夜温差变化较大,气候变化复杂,影响了水汽通量值。所以春秋两季的水汽通量与气温拟合相关性低于夏季。冬季气温与水汽通量相关性较差,因为冬天气温低,降水较少,影响水汽通量变化的因素较多,所以拟合相关性差。

表2 重庆缙云山针阔混交林生态系统样地各季度降水量与蒸散量及其所占比例

Table 2 Proportions of seasonal rainfall and evapotranspiration in sample plots of a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing

季节 Season	月份 Month	降水 Precipitation		蒸散 Evapotranspiration	
		降水量 Precipitation (mm)	比例 Proportion (%)	蒸散量 Evapotranspiration (mm)	比例 Proportion (%)
春季 Spring	3, 4, 5	419.57	28	230.96	29
夏季 Summer	6, 7, 8	680.52	46	325.53	41
秋季 Autumn	9, 10, 11	254.38	17	137.77	17
冬季 Winter	12, 1, 2	134.71	9	98.14	13
全年 Full year	1-12	1 489.18	100	792.40	100

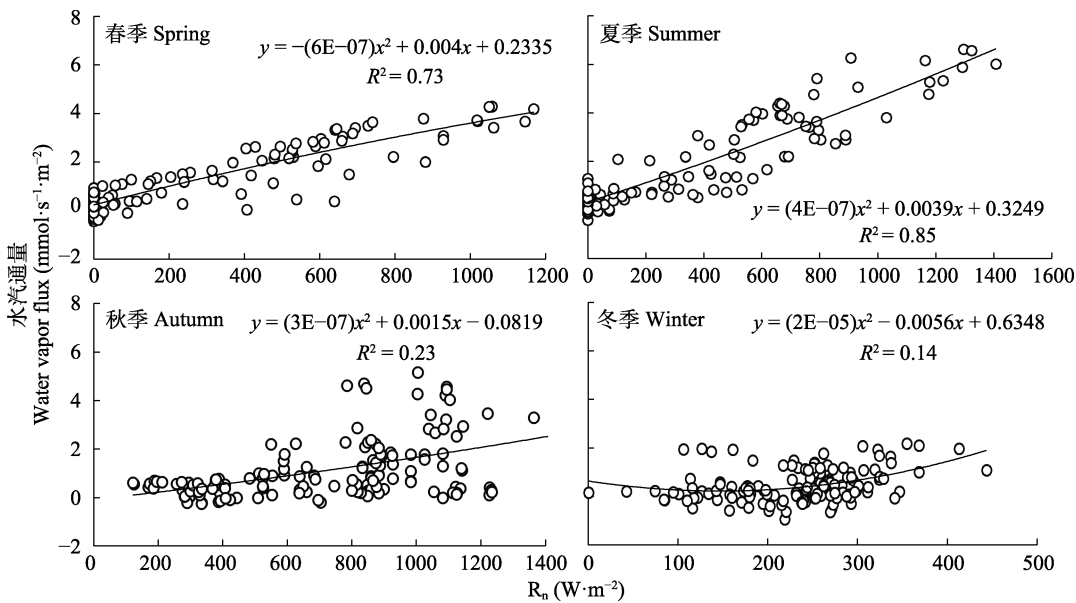


图7 重庆缙云山针阔混交林生态系统各季度水汽通量对净辐射(R_n)的拟合曲线。

Fig. 7 Fitting curves of water vapor fluxes to net radiations (R_n) within a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing.

2.5.3 饱和水汽压差与水汽通量

VPD是在某一温度下饱和水汽压与实际水汽压之间的差值,是代表大气水分状况的重要指标,反映大气的需水情况,是植物蒸腾的驱动力(张晓娟, 2015; 方成圆等, 2016),通过控制叶片气孔的关闭和大气水汽压梯度影响蒸腾作用。利用针阔混交

林生态系统不同季节的水汽通量数据与VPD进行拟合分析。结果(图9)显示,研究区的水汽通量与VPD的相关性显著且呈正相关关系。水汽通量在不同季节对VPD的响应不同,夏季的水汽通量对VPD响应最佳, R^2 为0.53; 其次是春季和秋季, R^2 分别为0.17和0.23; 冬季水汽通量对VPD响应最差, R^2 为0.14。

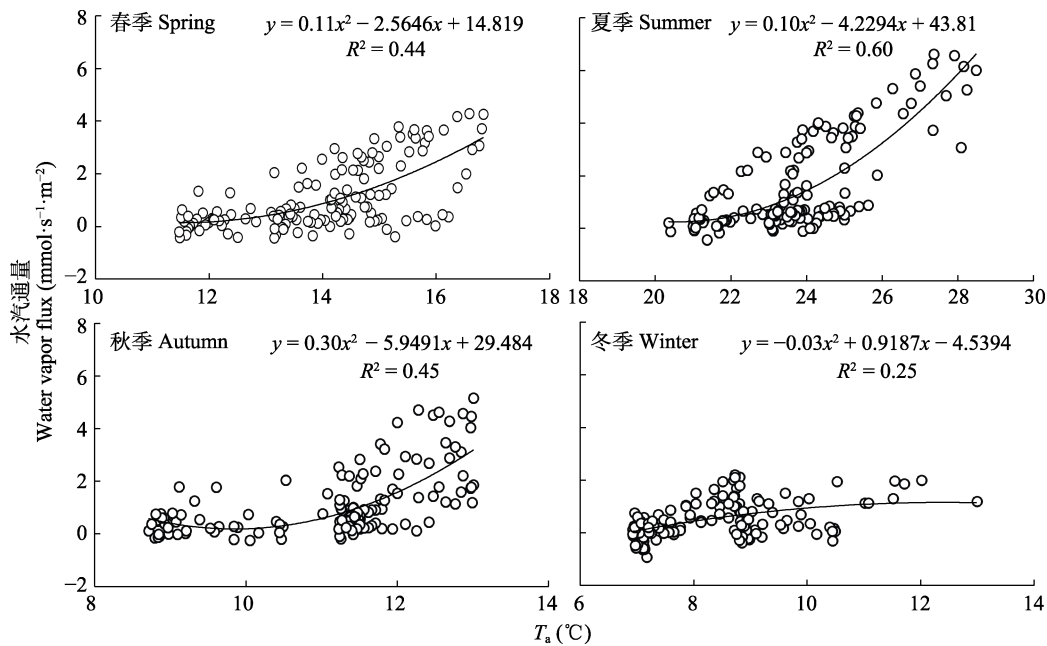


图8 重庆缙云山针阔混交林生态系统各季度水汽通量对气温(T_a)的拟合曲线。

Fig. 8 Fitting curves of water vapor fluxes to air temperatures (T_a) within a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing.

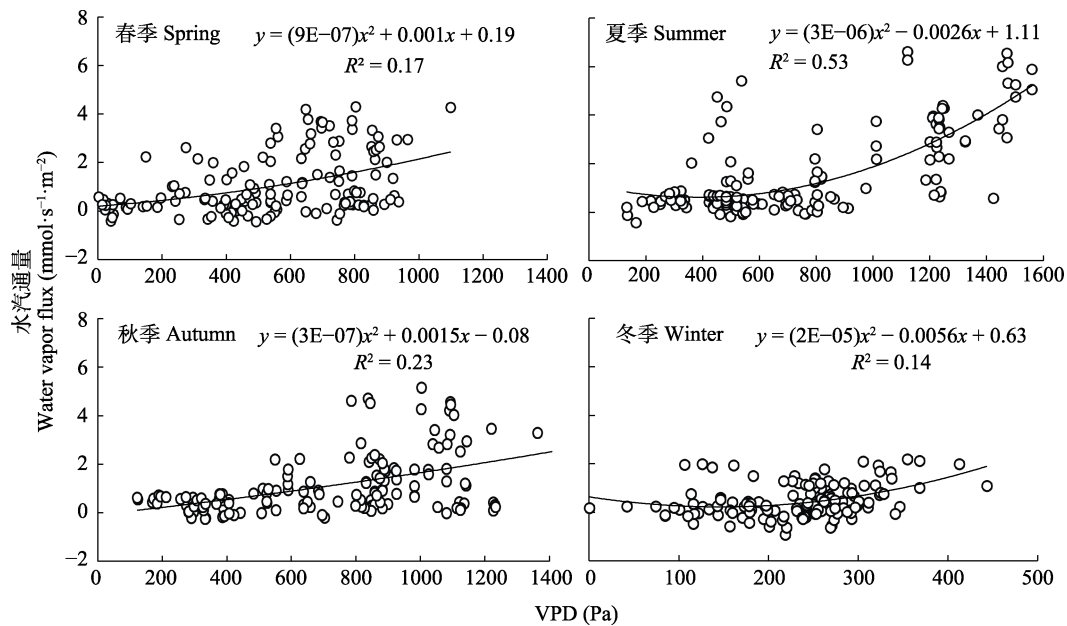


图9 重庆缙云山针阔混交林生态系统各季节水汽通量与饱和水汽压差(VPD)的拟合曲线。

Fig. 9 Fitting curves of water vapor fluxes to vapor pressure deficits (VPD) within a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing.

2.5.4 风速(W_s)与水汽通量

W_s 对水汽通量的影响比较复杂,与 W_s 的强弱、周围环境状况和当时的气候状况有很大关系。针阔混交林生态系统各季节水汽通量与 W_s 呈负相关关系(图10),水汽通量值随着 W_s 增大而逐渐减少,并且 W_s 小于 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各季节均没有水汽值, W_s $1\text{--}2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,各季节水汽通量值最佳。夏季拟合的相关性最佳, R^2 为0.61,因为夏季气温高,降水充足,微风能够促进植被叶片蒸腾和地表水分蒸发。冬季拟合相关性最差, R^2 为0.24。因为冬季气温低,降水量少,影响水汽通量因素较多, W_s 对水汽影响较小,所以相关性比较差。水汽通量主要集中在 W_s $1\text{--}3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内, W_s 超过 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水汽通量值基本趋于0。

3 讨论

3.1 涡度相关技术在缙云山针阔混交林生态系统的能量质量和适用性

能量闭合、通量足迹分析和风玫瑰图可以用来讨论涡度相关技术在缙云山针阔混交林生态系统的有效性和适用性。从能量闭合率来看,该研究区能量闭合率为0.76,处于国际通量网站点的平均闭合率0.55–0.99 (Wilson *et al.*, 2002)、ChinaFLUX站点的平均闭合率0.49–0.81 (李正泉等, 2004)和涡度相关系统对山区林地通量观测的能量闭合率0.70–0.90 (Wilson *et al.*, 2002; Kumagai *et al.*, 2005)范围之内,

且处于偏上的水平。本研究的能量闭合率大于太湖生态系统的能量闭合率0.59 (王伟等, 2017),九寨沟针阔叶混交林生态系统能量闭合率0.71 (李桐等, 2018),常绿落叶阔叶混交林生态系统的能量闭合率0.69 (方成圆等, 2016)。说明研究区能量闭合较高,涡度相关技术适用于研究区,且数据质量较好,可信度较高。从图2和图3可以看出,研究区全年主风向以东北风为主,与千烟洲人工林(李菊等, 2006)相似。全年尺度上通量贡献来源基本不变,风向稳定。相比于农田生态系统,森林山地生态系统的通量贡献区偏小,是因为森林山地下垫面不平整,附近的大气在摩擦作用下产生环流,导致通量贡献区偏小(周成等, 2006; 吴东星等, 2017; 刘璇等, 2019)。综合图1–3来看,涡度相关技术在研究区的适用性强。

3.2 缙云山针阔混交林生态系统水汽通量变化特征

针阔混交林全年水汽日变化特征基本为单峰型曲线,与其他研究(李菊等, 2006; 刘玉莉等, 2014; 张璇, 2019; 耿思文等, 2021)得出的结果一致。夜间稳定在0,是因为夜晚为林内温度最低时刻, R_n 也比较低,地表蒸发和植物蒸腾作用比较弱;12:00–14:00达到峰值,该时间段温度较高, R_n 强,植物蒸腾和地表蒸发比较多,水汽通量也最大;18:00–19:00水汽通量值又逐渐趋近于0。这与刘玉莉等(2014)、牛晓栋等(2016)、李菊等(2006)、张娜等(2010)和张晓娟(2016)等的不同生态系统的日变

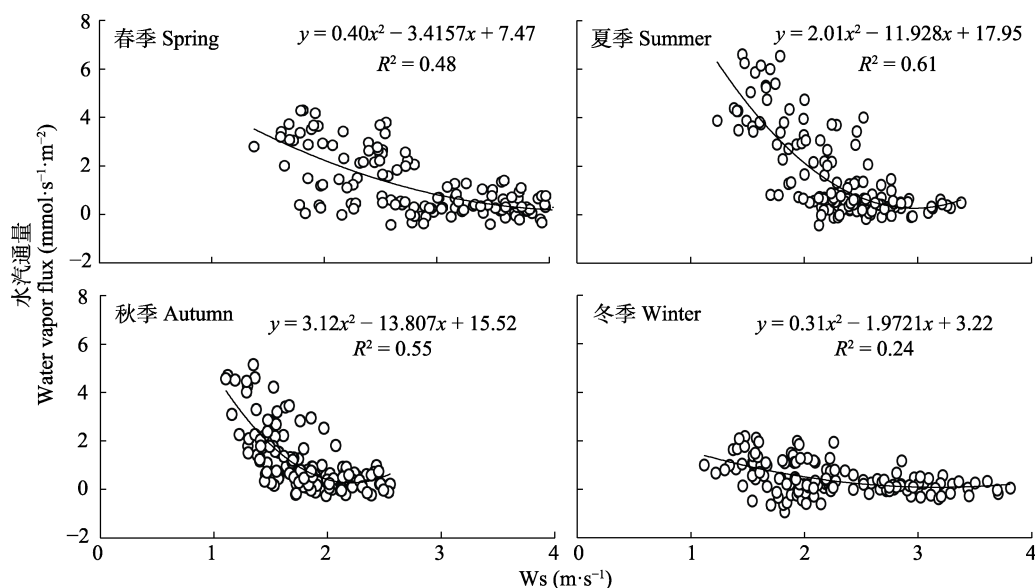


图10 重庆缙云山针阔混交林生态系统各季度水汽通量对风速(W_s)的拟合曲线。

Fig. 10 Fitting curves of water vapor fluxes to wind speed (W_s) within a conifer-broadleaf mixed forest ecosystem in Jinyun Mountain, Chongqing.

化研究结果一致。各月水汽通量平均日变化范围在 $-0.001\sim 6.623\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 与神农架大九湖泥炭生态系统(彭凤姣等, 2017)相似。一些月份在午间出现双峰趋势(牛晓栋等, 2016), 这是植物的“光合午休”造成的。因为当天中午光照强度过大, 温度升高, 植物蒸腾失水较多, 导致植物叶片被迫关闭气孔, 水汽通量值降低(高冠龙等, 2020)。从季节尺度来看, 夏季温度高, 植物生理活动最活跃, 蒸腾和蒸发较多, 水汽通量也较高(李菊等, 2006); 春秋两季水汽通量日变化大致相同, 均低于夏季, 春季是植物生长活动最为强烈的时候, 所以叶片蒸腾比较强, 但温度较低, R_n 较低; 秋季温度降低, 植物生理和化学活动减弱, 蒸腾也开始减少, 秋季水汽通量日变化较低。冬季温度为一年中最低, R_n 也是一年中最低, 降水较少, 植物蒸腾和地表蒸发很少, 所以水汽通量为全年最低(张娜等, 2010; 刘玉莉等, 2014)。

3.3 缙云山针阔混交林生态系统蒸散发和降水量特征

缙云山针阔混交林生态系统年降水量1 489.18 mm, 蒸散总量为792.40 mm, 针阔混交林生态系统年蒸散量占同期降水量的53.21%, 针阔混交林植被覆盖度高, 一定程度减少了地表水分蒸发, 保持水分在林中循环。与相似纬度且气候类型接近的不同生态系统站点对比, 结果(表3)显示, 湖南桃源水稻农田、广东鼎湖山常绿阔叶林、江西千烟洲人工针叶林、江苏天目湖毛竹(*Phyllostachys edulis*)林生态系统和福建云霄红树林生态系统的全年蒸散量分别占全年降水量的65.21%、55.94%、51.46%、48.30%和69.08%。不同生态系统年蒸散总量差异较大, 针阔混交林生态系统年蒸散总量高于江西千烟洲人工

林生态系统(李菊等, 2006)和江苏天目湖毛竹林生态系统(Tang *et al.*, 2014), 仅次于广东鼎湖山常绿阔叶林生态系统(张娜等, 2010), 远低于福建云霄红树林湿地生态系统(林珮文, 2019)和湖南桃源水稻农田生态系统(尹春梅等, 2020)。因为福建云霄红树林湿地和湖南桃源水稻农田生态系统长期处于湿润或积水状态, 植被覆盖度低, 水分蒸散占比高。不同生态系统年蒸腾总量为湿地>常绿阔叶林>针阔混交林>农田>毛竹林>人工针叶林, 与郭瑞萍和莫兴国(2007)以及彭凤姣等(2017)的结论相似, 即湿地>森林>农田。

3.4 环境因子对水汽通量的影响

缙云山针阔混交林水汽通量与 R_n 正相关, 夏季相关性最佳, 其次是春季和秋季, 冬季在四季中相关系数最小。在其他生态系统水汽通量与 R_n 相关关系的研究中, 天目山常绿阔叶林是夏季的相关系数($R^2 = 0.50$)最大(方成圆等, 2016), 江西千烟洲是晴天的相关系数($R^2 = 0.55$)最大(李菊等, 2006), 安吉毛竹林是夏季的相关系数($R^2 = 0.61$)最大(刘玉莉等, 2014), 海南橡树林雨季(5–10月)的相关系数($R^2 = 0.76$)最大(张晓娟等, 2015), 神农架大九湖泥炭湿地夏季的相关系数($R^2 = 0.83$)最大(翁闰畅等, 2020); 水汽通量与 R_n 相关系数也是夏季最高($R^2 = 0.85$), 高于其他生态系统水汽通量与 R_n 相关系数。缙云山针阔混交林 R^2 最低是0.14, 高于天目山常绿阔叶林(0.13)、安吉毛竹林(0.05)和太湖源雷竹林(*P. violascens*)(0.02); 低于海南橡胶林(0.30)、神农架大九湖泥炭湿地(0.45)。所有台站的最低 R^2 均出现在冬季, 因为冬季水汽通量普遍偏低, 外界气温低, 降水量也较少, 植物生理活动几乎停止, 植物蒸腾

表3 不同生态系统植被蒸散量对比
Table 3 Contrast of evapotranspiration among different ecosystems

站点 Site	生态类型 Ecosystem type	观测年份 Observation year	降水量 Precipitation (mm)	蒸发量 Evaporation (mm)	文献 Reference
湖南桃源 Taoyuan, Hunan	水稻田 Rice field	2014	1 150.00	705.00	Yin <i>et al.</i> , 2020
广东鼎湖山 Dinghushan, Guangdong	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	2009	1 716.00	960.00	Zhang <i>et al.</i> , 2010
江西千烟洲 Qianyanzhou, Jiangxi	人工针叶林 Artificial coniferous forest	2004	1 323.60	736.10	Li <i>et al.</i> , 2006
江苏天目湖 Tianmuhu, Jiangsu	毛竹林 Bamboo forest	2013	1 543.10	745.30	Tang <i>et al.</i> , 2014
福建云霄 Yunxiao, Fujian	红树林湿地 Mangrove wetland	2008	1 714.50	1 184.40	Lin, 2019
重庆缙云山 Jinyunshan, Chongqing	针阔混交林 Conifer-broadleaf mixed forest	2019–2020	1 489.18	792.40	本研究 This study

和地表水分蒸发也比较少。夏季雨水充足, 气温较高, R_n 也高, 植物叶片蒸腾旺盛, 地表水分蒸发增多, 所以夏季的水汽通量与 R_n 的相关性要好于其他季节。

缙云山针阔混交林水汽通量与气温也呈正相关关系, 夏季 R^2 较好, 为 0.60, 高于海南橡胶树 (0.45) (张晓娟等, 2015) 和神农架大九湖泥炭 (0.55) (翁闻畅等, 2020), 其他季节相关性比较低, 说明在其他季节水汽通量主要受其他的环境因子影响。因为重庆缙云山属于亚热带季风湿润性气候, 夏季气温高, 降水较多, 蒸散量也比较高, 所以相关性也较高, 冬季气温低, 降水量少, 影响水汽通量的因素较多, 气温对水汽通量的影响较低, 所以相关性不高。

缙云山针阔混交林水汽通量与 VPD 正相关, 研究区的夏季 R^2 最大, 为 0.53, 水汽通量与 VPD 有显著相关性且大于海南橡胶林 (0.36) (张晓娟等, 2015)、安吉毛竹林 (0.31) (刘玉莉等, 2014) 和神农架大九湖泥炭湿地 (0.41) (翁闻畅等, 2020) 等地区。原因有两方面, 一是针阔混交林植被叶片蒸腾作用与 VPD 成正比, 从而叶片蒸腾也与 VPD 成正比 (Anthoni *et al.*, 1999); 二是地表水分蒸发与 VPD 成正比, VPD 越大, 蒸发作用也就越强。夏季气温高, 降水多, 正是针阔混交林旺盛生长季, 需水量高, 外界大气水汽压差越大, 叶片蒸腾量和地表蒸发也越高, 相关性也就越好。

针阔混交林生态系统水汽通量与 W_s 负相关, 与千烟洲人工林 (李菊等, 2006) 水汽通量与 W_s 没有相关性不同, 与海南橡胶树 (张晓娟等, 2015) W_s 主要影响雨季的结果相似, 主要是对夏季的水汽通量影响较大, 且受 W_s 大小影响, 微风时水汽通量较大, W_s 超过 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 水汽通量值逐渐趋于 0。这可能是微风能够使气孔附近湿度向上层空气扩散, 导致叶片的蒸腾阻力变小, 间接促进了蒸腾作用, 强风可能会导致植被关闭气孔, 使得植被蒸腾减弱 (葛亮等, 2018)。 W_s 对水汽通量的影响比较复杂, 我们之后还会扩大时间序列对 W_s 与水汽通量相关性影响的研究。

4 结论

研究期内, 针阔混交林生态系统能量闭合率为 0.77 ($R^2 = 0.54$), 在国际认可的山区林地通量观测的能量闭合率在 0.70–0.90 之间, 且高于大部分生态

系统研究区。对通量足迹图 (图 2)、风玫瑰图 (图 3) 和研究期内的风速与水汽分布图 (图 10) 进行对比发现, 高贡献区域所处方向与全年主风向东北方向一致。综合说明涡度相关技术在研究区适用性强, 监测数据稳定且干扰较少。

缙云山 2019 年 9 月到 2020 年 8 月针阔混交林生态系统水汽通量变化特征为: 平均日变化范围为 $-0.001 \sim 6.623 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 研究期内水汽通量基本为正值, 说明该生态系统为水汽源。水汽通量在各月日均变化上有明显的单峰趋势, 7:00–8:00 水汽通量值逐渐上升, 12:00–14:00 达到峰值, 18:00–19:00 水汽通量值趋近于 0; 8 月水汽通量值最大 ($6.623 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 12 月最小 ($-0.001 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。在季节尺度上水汽通量也呈现单峰趋势, 夏季水汽通量变化特征最明显, 冬季水汽通量变化最差。

针阔混交林研究期内蒸散总量 (792.40 mm) 占降水总量 (1 489.18 mm) 的 53.21%, 夏季蒸散量 (325.53 mm) 和降水量 (680.52 mm) 最高, 占全年蒸散量和降水量的 41% 和 46%。在季节尺度降水量和蒸散量均表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 与不同生态系统站点对比中得出湿地 > 森林 > 农田的结论。

缙云山针阔混交林生态系统水汽通量与 R_n 、气温和 VPD 环境因子正相关, W_s 与水汽通量负相关, 均为夏季的 R^2 最高, 分别为 0.85、0.60、0.53 和 0.61。因为夏季是针阔混交林生长季, 气温高, 降水多, 促进植物叶片蒸腾和地表水分蒸发。VPD 对水汽通量相关性稍低, 这与缙云山常年雾天较多, 湿度较大有关, W_s 对水汽影响受其他因子干扰较多, 综合来看, R_n 、气温是影响水汽通量的主要气象因子。

水汽通量是反映水分状况的重要指标, 对研究生态系统能量平衡和物质流动具有重要意义 (Jung *et al.*, 2021)。涡度相关技术作为研究水汽通量最先进、最直接的观测方法得到了广泛的认同 (李菊等, 2006), 应用涡度相关技术对重庆缙云山针阔混交林生态系统水汽通量特征进行了初步研究, 与其他同类研究不同站点相比, 本站点研究结果较好。但是本研究仅分析了一年的观测数据, 必然存在一些偶然和不确定因素, 为了深入了解涡度相关技术在重庆缙云山针阔混交林生态系统的适用性以及水分循环平衡规律, 还需要长时间观测及进一步的分析 and 验证。

参考文献

- Allen RG, Pereira LS, Howell TA, Jensen ME (2011). Evapotranspiration information reporting: I. factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98, 899-920.
- Anthoni PM, Law BE, Unsworth MH (1999). Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3), 151-168.
- Fang CY, Jiang H, Niu XD, Chen XF, Sun H (2016). Energy flux and balance analysis of evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest in Tianmu Mountain during growing season. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 45, 391-397. [方成圆, 江洪, 牛晓栋, 陈晓峰, 孙恒 (2016). 天目山常绿、落叶阔叶混交林生长季能量通量及平衡分析. 福建农林大学学报(自然科学版), 45, 391-397.]
- Gao GL, Feng Q, Liu XD (2020). Stomatal and no-stomatal limitations to photosynthesis of *Populus euphratica* leaves under natural conditions. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(11), 182-188. [高冠龙, 冯起, 刘贤德 (2020). 自然条件下胡杨叶片光合作用的气孔、非气孔限制. 干旱区资源与环境, 34(11), 182-188.]
- Ge L, Dong XH, Li L, Zhao Q, Yan DY (2018). Effects of meteorological factors on daytime transpiration of citrus trees. *Water Saving Irrigation*, (12), 17-23. [葛亮, 董晓华, 李璐, 赵乔, 严冬英 (2018). 气象因素对柑桔树植株日间蒸腾作用的影响研究. 节水灌溉, (12), 17-23.]
- Geng SW, Wu ZX, Yang C (2021). Water vapor flux exchange of rubber forest stand in Hainan Danzhou and its response to environmental factors. *Journal of Northwest Forestry University*, 36(1), 77-85. [耿思文, 吴志祥, 杨川 (2021). 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. 西北林学院学报, 36(1), 77-85.]
- Guo RP, Mo XG (2007). Differences of evapotranspiration on forest, grassland and farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18, 1751-1757. [郭瑞萍, 莫兴国 (2007). 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异. 应用生态学报, 18, 1751-1757.]
- Huang YH, Gan XH, Zhang WQ, Pan LJ, Wang M, Tang HH (2017). Carbon storage of young conifer and broadleaf mixed forest on a *Cunninghamia lanceolata* site in south subtropics. *Ecological Science*, 36(4), 137-145. [黄钰辉, 甘先华, 张卫强, 盘李军, 王敏, 唐洪辉 (2017). 南亚热带杉木林皆伐迹地幼龄针阔混交林生态系统碳储量. 生态科学, 36(4), 137-145.]
- Jung S (2021). Vapor flux on bumpy surfaces: condensation and transpiration on leaves. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 37, 4690-4699.
- Kljun N, Calanca P, Rotach MW, Schmid HP (2015). A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 8, 3695-3713.
- Kumagai T, Aoki S, Nagasawa H, Mabuchi T, Kubota K, Inoue S, Utsumi Y, Otsuki K (2005). Effects of tree-to-tree and radial variations on sap flow estimates of transpiration in Japanese cedar. *Agricultural and Forest Meteorology*, 135, 110-116.
- Li J, Liu YF, Yang XG, Li J (2006). Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station. *Acta Ecologica Sinica*, 26, 2449-2456. [李菊, 刘允芬, 杨晓光, 李俊 (2006). 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 26, 2449-2456.]
- Li T, Yan CH, Wang B, Zhao WL, Zhang Y, Qiu GY (2018). Characteristics of energy balance in a mixed forest in Jiuzhaigou Valley. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 8098-8106. [李桐, 鄢春华, 王蓓, 赵文利, 张杨, 邱国玉 (2018). 九寨沟针阔混交林能量平衡特征. 生态学报, 38, 8098-8106.]
- Li YS (2001). Effects of forest on water circle on the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 16, 427-432. [李玉山 (2001). 黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究. 自然资源学报, 16, 427-432.]
- Li ZQ, Yu GR, Wen XF, Zhang LM, Ren CY, Fu YL (2004). Evaluation of energy balance closure of ChinaFLUX observation network. *Scientia Sinica (Terrae)*, 34(Suppl. II), 46-56. [李正泉, 于贵瑞, 温学发, 张雷明, 任传友, 伏玉玲 (2004). 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. 中国科学D辑: 地球科学, 34(增刊II), 46-56.]
- Lin PW (2019). *Effects of Tides on Water Heat Balance and Carbon Flux in Mangrove Wetlands*. Master degree dissertation, Xiamen University, Xiamen, Fujian. [林珮文 (2019). 潮汐对红树林湿地水热平衡和碳通量的影响. 硕士学位论文, 厦门大学, 福建厦门.]
- Liu HZ, Tu G, Dong WJ, Fu CB, Shi LQ (2006). Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO₂ between the land surface and atmosphere in the semi-arid area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 30, 108-118. [刘辉志, 涂钢, 董文杰, 符淙斌, 石立庆 (2006). 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化. 大气科学, 30, 108-118.]
- Liu X, Wang F, Zhang QL, Tian Y, Ren JH (2019). Energy flux variation characteristics and closure degree in larch forest. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 50, 546-549. [刘璇, 王飞, 张秋良, 田原, 任建华 (2019). 兴安落叶松林能量通量变化特征及闭合度研究. 山东农业大学学报(自然科学版), 50, 546-549.]
- Liu YL, Jiang H, Zhou GM, Chen YF, Sun C, Yang S (2014). Water vapor flux variation characteristic and the relationship with its environment factors in *Phyllostachys edulis*

- forest in Anji. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 4900-4909. [刘玉莉, 江洪, 周国模, 陈云飞, 孙成, 杨爽 (2014). 安吉毛竹林水汽通量变化特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 34, 4900-4909.]
- Liu Z, Pan YP, Song T, Hu B, Wang LL, Wang YS (2021). Eddy covariance measurements of ozone flux above and below a southern subtropical forest canopy. *Science of the Total Environment*, 791, 148338. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148338.
- Lu Q, Niu CW, Jia YW, Hao CF, Gao XR, Qiu YQ, Liu H, Du JK (2020). Analysis and evolution study to national water cycle flux. *China Water Resources*, (19), 22-26. [卢琼, 牛存稳, 贾仰文, 郝春洋, 高学睿, 仇亚琴, 刘欢, 杜军凯 (2020). 全国水循环通量解析及其演进研究. 中国水利, (19), 22-26.]
- Niu XD, Jiang H, Fang CY, Chen XF, Sun H (2016). Water vapor flux features of an evergreen and deciduous broad-leaf mixed forest in Mount Tianmu area. *Journal of Zhejiang A&F University*, 33, 216-224. [牛晓栋, 江洪, 方成圆, 陈晓峰, 孙恒 (2016). 天目山常绿落叶阔叶混交林生态系统水汽通量特征. 浙江农林大学学报, 33, 216-224.]
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D (2006). Towards a standardized processing of net ecosystem exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 571-583.
- Peng FJ, Ge JW, Li YF, Li YY, Cheng LM, Zhang ZQ (2017). Characteristics of water vapor flux and their ecological significance in the peat wetlands of Dajiuhe, Shennongjia. *Safety and Environmental Engineering*, 24(5), 1-8. [彭凤姣, 葛继稳, 李永福, 李艳元, 程腊梅, 张志麒 (2017). 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量特征及生态意义. 安全与环境工程, 24(5), 1-8.]
- Rannik Ü, Altimir N, Raittila J, Suni T, Gaman AC, Hussein T, Hölttä T, Lassila H, Latokartano M, Lauri A, Natsheh A, Petäjä T, Sorjamaa R, Ylä-Mella H, Keronen P, *et al.* (2002). Fluxes of carbon dioxide and water vapour over Scots pine forest and clearing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111, 187-202.
- Tang X, Li H, Desai AR, Nagy Z, Luo J, Kolb TE, Olioso A, Xu X, Yao L, Kutsch W (2014). How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? *Scientific Reports*, 4, 7483. DOI: 10.1038/srep07483.
- Wang Q, Wang YQ, Ma C, Wang B, Li YF (2019). Characteristics of carbon fluxes and their response to environmental factors in ecosystems of mixed coniferous and broad-leaved forests in Jinyun Mountain. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28, 565-576. [王倩, 王云琦, 马超, 王彬, 李一凡 (2019). 缙云山针阔混交林碳通量变化特征及影响因子研究. 长江流域资源与环境, 28, 565-576.]
- Wang W, Shen SH, Liu SD, Zhang M, Xiao W, Wang YW, Li XH (2017). Mechanistic analysis of the observed energy imbalance of Lake Taihu. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 5935-5950. [王伟, 申双和, 刘寿东, 张弥, 肖薇, 王咏薇, 李旭辉 (2017). 太湖生态系统能量闭合特征及其影响因素. 生态学报, 37, 5935-5950.]
- Weng WC, Ge JW, Chen JW, Li YF, Cheng LM, Zhang ZQ (2020). Water vapor flux characteristics and their relationship with environmental factors in the subalpine peat wetlands of Dajiuhe, Shennongjia. *Plant Science Journal*, 38, 493-505. [翁闻畅, 葛继稳, 湛佳伟, 李永福, 程腊梅, 张志麒 (2020). 神农架大九湖亚高山泥炭湿地水汽通量特征及其与相关环境因子的关系. 植物科学学报, 38, 493-505.]
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Bernbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, *et al.* (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223-243.
- Wu DX, Li GD, Zhang X (2017). Flux footprint of winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 28, 3663-3674. [吴东星, 李国栋, 张茜 (2017). 华北平原冬小麦农田生态系统通量贡献区. 应用生态学报, 28, 3663-3674.]
- Wu JB, Guan DX, Zhang M, Han SJ, Jin CJ (2005). Comparison of eddy covariance and BREB methods in determining forest evapotranspiration—Case study on broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 24, 1245-1249. [吴家兵, 关德新, 张弥, 韩士杰, 金昌杰 (2005). 涡动相关法与波文比-能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例. 生态学杂志, 24, 1245-1249.]
- Xu SJ, Zeng B, Su XL, Lei ST, Liu JH (2012). Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2174-2184. [徐少君, 曾波, 苏晓磊, 类淑桐, 刘建辉 (2012). 基于RS/GIS的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究. 生态学报, 32, 2174-2184.]
- Xu ZW, Liu SM, Xu TR, Wang JM (2009). Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system. *Advances in Earth Science*, 24, 372-382. [徐自为, 刘绍民, 徐同仁, 王介民 (2009). 涡动相关仪观测蒸散量的插补方法比较. 地球科学进展, 24, 372-382.]
- Yang K, Wang JM (2008). A temperature prediction correction method for calculating surface soil heat flux based on soil temperature and humidity data. *Scientia Sinica (Terrae)*, 38, 243-250. [阳坤, 王介民 (2008). 一种基于土壤温湿度资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法. 中国科学D辑: 地球科学, 38, 243-250.]

- Yin CM, Fu XG, Wei WX, Xie XL (2020). A long-term monitoring dataset of soil moisture content under different utilization modes of red soil slope land in Taoyuan Agroecology Research Station, 2004–2014. *China Scientific Data*, 5, 117-126. [尹春梅, 傅心赣, 魏文学, 谢小立 (2020). 2004–2014年桃源站红壤坡地不同利用方式下土壤含水量长期监测数据集. 中国科学数据, 5, 117-126.]
- Yin XX, Le X, Zhou H, Ma YM, Tian CG, Cao Y, Lei YD (2020). Interannual variability of gross primary productivity at global FLUXNET sites and its driving factors. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 43, 1106-1114. [尹茜茜, 乐旭, 周浩, 马一勉, 田晨光, 曹阳, 雷亚栋 (2020). 全球FLUXNET站点总初级生产力的年际变化及其主导因子解析. 大气科学学报, 43, 1106-1114.]
- Yu GR, Ren W, Chen Z, Zhang LM, Wang QF, Wen XF, He NP, Zhang L, Fang HJ, Zhu XJ, Gao Y, Sun XM (2016). Construction and progress of Chinese terrestrial ecosystem carbon, nitrogen and water fluxes coordinated observation. *Journal of Geographical Sciences*, 26, 803-826.
- Yu GR, Zhang LM, Sun XM (2014). Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observant and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 33, 903-917. [于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏 (2014). 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望. 地理科学进展, 33, 903-917.]
- Zhang M, Yuan X (2020). Rapid reduction in ecosystem productivity caused by flash droughts based on decade-long FLUXNET observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24, 5579-5593.
- Zhang N, Qiao YN, Liu XZ, Chu GW, Zhang DQ, Yan JH (2010). Nutrient characteristics in incident rainfall, throughfall, and stemflow in monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 18, 502-510. [张娜, 乔玉娜, 刘兴诏, 褚国伟, 张德强, 闫俊华 (2010). 鼎湖山季风常绿阔叶林大气降雨、穿透雨和树干流的养分特征. 热带亚热带植物学报, 18, 502-510.]
- Zhang X (2019). *Water Transport Characteristics and Response Mechanism to Environmental Factors for Conifer-Broadleaf Mixed Forest in Jinyun Mountain, Chongqing*. PhD dissertation, Beijing Forestry University, Beijing. [张璇 (2019). 重庆缙云山针阔混交林水分传输特征及对环境因子的响应机制. 博士学位论文, 北京林业大学, 北京.]
- Zhang XJ (2016). *Transpiration Characteristics Research of Rubber Plantation in Western of Hainan Island*. PhD dissertation, Hainan University, Haikou. [张晓娟 (2016). 海南岛西部橡胶林生态系统蒸散特征研究. 博士学位论文, 海南大学, 海口.]
- Zhang XJ, Wu ZX, Yang C, Guan LM (2015). Water vapor flux exchange and its environmental factors in a tropical rubber plantation ecosystem in Hainan Island. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 36, 1432-1439. [张晓娟, 吴志祥, 杨川, 管利民 (2015). 海南岛橡胶林生态系统水汽通量及其影响因子研究. 热带作物学报, 36, 1432-1439.]
- Zhou C, Chen JY, Cai XH (2006). Turbulent fluxes over heterogeneous surfaces and the blending height. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 42, 315-319. [周成, 陈家宜, 蔡旭晖 (2006). 非均匀地表的湍流通量和掺混高度. 北京大学学报(自然科学版), 42, 315-319.]

责任编辑: 王政权 编辑: 赵航