

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2020.40493

翁闻畅, 葛继稳, 谌佳伟, 李永福, 程腊梅, 张志麒. 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[J]. 植物科学学报, 2020, 38(4): 493-505

Weng WC, Ge JW, Chen JW, Li YF, Cheng LM, Zhang ZQ. Water vapor flux characteristics and their relationship with environmental factors in the subalpine peat wetlands of Dajiuhu, Shennongjia[J]. Plant Science Journal, 2020, 38(4): 493-505

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

翁闻畅^{1,2,3}, 葛继稳^{1,2,3*}, 谌佳伟^{1,2,3}, 李永福⁴, 程腊梅⁵, 张志麒⁶

(1. 中国地质大学(武汉)盆地水文过程与湿地生态恢复学术创新基地, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)湿地演化与生态恢复湖北省重点实验室, 武汉 430074; 3. 中国地质大学(武汉)生态环境研究所, 武汉 430074; 4. 新疆农业科学院, 乌鲁木齐 830091; 5. 武汉伟特伦生态环境研究所, 武汉 430079; 6. 神农架国家公园管理局, 湖北神农架林区 442417)

摘 要:以神农架大九湖亚高山泥炭湿地为对象, 采用涡度相关技术, 通过采集湿地水汽通量的年际数据, 并进行数据统计和分析, 研究水汽通量特征及其与环境因子的关系。结果显示: (1) 大九湖泥炭湿地全年蒸散量占降水量的 58.59%, 能够满足大九湖生态系统水汽循环的需要。(2) 大九湖泥炭湿地的水汽通量全年各月份日均变化大多为正值, 即释放水汽, 表明该地区总体表现为水汽源; 在季节尺度上, 水汽通量最大值出现在夏季, 夏季水汽通量日均变化幅度最大。(3) 净辐射月均变化幅度较大, 其中夏季净辐射最大, 占全年的 34.96%。各季节的净辐射与水汽通量均呈正相关, 春季、夏季和秋季的拟合效果(R^2)均超过 0.7, 夏季最高(0.8347), 且高于其他同纬度 6 个地区。(4) 除 2018 年 1 月外, 各月份水汽通量与气温均呈显著正相关, 特别是夏季最显著相关, 这与夏季植物蒸腾和水分蒸发旺盛有关。(5) 气温和净辐射对水汽通量的影响在各季节均显著, 但各季节间有所差异。研究表明净辐射在大九湖泥炭湿地水汽循环中的作用大于气温对水汽通量的影响。

关键词: 亚高山泥炭湿地; 水汽通量; 相关环境因子; 净辐射

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2020)04-0493-13

Water vapor flux characteristics and their relationship with environmental factors in the subalpine peat wetlands of Dajiuhu, Shennongjia

Weng Wen-Chang^{1,2,3}, Ge Ji-Wen^{1,2,3*}, Chen Jia-Wei^{1,2,3}, Li Yong-Fu⁴, Cheng La-Mei⁵, Zhang Zhi-Qi⁶

(1. Laboratory of Basin Hydrology and Wetland Eco-restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China; 3. Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China; 5. Wuhan Wetland Institute of Ecology and Environmental Sciences, Wuhan 430079, China; 6. Shennongjia National Park Administration Bureau, Shennongjia Forestry District, Hubei 442417, China)

Abstract: Using the eddy covariance technique, we collected interannual data on wetland water vapor flux and conducted data analysis to study the characteristics of water vapor flux and its relationship with environmental factors in the subalpine peat wetlands of Dajiuhu, Shennongjia. Results showed that: (1) Evapotranspiration accounted for 58.59% of precipitation, indicating that precipitation could meet the needs of water vapor circulation in

收稿日期: 2019-11-14, 退修日期: 2020-02-11。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31971490)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China(31971490)。

作者简介: 翁闻畅(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为湿地生态学研究(E-mail: 543541289@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence, E-mail: gejiwen2002@aliyun.com)。

Dajiuhu. (2) Annual diurnal variation of water vapor flux was mostly positive (release of water vapor), indicating that the peat ecosystem of Dajiuhu was the main source of water vapor. Seasonally, maximum diurnal variation appeared in summer, with the largest change range. (3) Average net radiation varied largely over the year and the maximum appeared in summer, accounting for 34.96% of total radiation over the whole year. There was a high correlation between water vapor flux and net radiation in every season. Correlation coefficients (R^2) in spring and summer were greater than 0.7, with the maximum of 0.8347 appearing in summer, better than any other survey region at similar latitude. (4) There was a significant positive correlation between water vapor flux and air temperature each month, except January 2018, with the highest correlation in summer. This was mostly because both plant transpiration and surface evaporation were highly active in summer. (5) Air temperature and net radiation had significant effects on water vapor flux in every season, but correlation varied from season to season. These results showed that net radiation played a more important role in the water vapor cycle than air temperature in the subalpine peat wetlands of Dajiuhu, Shennongjia.

Key words: Subalpine peat wetlands; Water vapor flux; Related environmental factors; Net radiation

目前, 温室气体(主要为 CH_4 、 CO_2) 的浓度变化导致了全球气候变暖等气候变化, 也加剧了水资源的全球分布不均衡, 而这种不均衡的分布格局直接导致全球水资源短缺现象日益加剧, 未来水资源短缺的问题将直接影响到全球经济的发展, 因此水资源短缺问题被列入影响国家和地区发展的重大环境问题之一^[1,2]。水资源短缺的问题来自于水循环的流失和环节中断, 环境污染成为影响水循环的重要因素, 而这种环境污染也会直接影响到水循环的各个环节, 包括动物、微生物甚至人类^[3], 因此研究水循环过程对于保护水资源十分重要^[4,5]。水汽通量是单位时间内通过单位面积的水汽量, 是研究水循环过程的重要指标, 水汽通量是衡量湿地和大气之间水汽交换的主要方式^[6], 也是探究气候变化的重要研究因子, 因此研究水汽通量有着重要的科学价值和前景。

如今涡度相关技术被广泛用于研究森林、湿地等生态系统中, 该项技术是由 Swinbank 等于 1951 年提出的^[7], 起初被应用于研究草地, 后来发现在湿地等生态系统中也具有重要作用^[8-10]。目前, 涡度相关系统已成为研究 CO_2 、 CH_4 和水热通量的标准方法之一^[11-13]。国内涡度相关技术主要应用于碳通量的研究, 对 H_2O 通量的观测相对较少, 且大部分研究主要针对于森林生态系统^[14]。张晓娟等^[15]以海南岛儋州地区橡胶林为对象研究

发现, 2010 年橡胶林全年 H_2O 通量基本为正值, 即橡胶林为水汽源。Neilson 等^[16]和 Hetherington 等^[17]对北美地区植被的水汽通量的研究发现, 水分情况与其分布高度相关。王妍^[18]对长江中下游滩地抑螺防病林生态系统的观测发现, 两个站点的年 H_2O 通量值分别为 $0.9577 \times 10^6 \text{g/m}^2$ 和 $1.085 \times 10^6 \text{g/m}^2$, 生态系统表现为水汽源。目前有关湿地水汽通量的研究较少, 曹生奎等^[19]对青藏高原高寒湿地生态系统的研究发现, 青藏高原的氧气与水汽通量呈负相关关系。李金群等^[20]对大九湖泥炭湿地水分利用效率 (WUE) 和蒸散量 (ET) 的关系进行了研究, 发现在夏、冬两季, WUE 和 ET 呈负相关。彭凤娇等^[21]研究了大九湖水汽通量和饱和水汽压差 (VPD) 的关系, 发现生长季的初期和末期, 水汽通量先随 VPD 的增大而升高, 再随 VPD 的增大而降低。

湿地生态系统的组成介于陆地和海洋之间, 起到承上启下的作用^[22,23]。其对水循环起到储备和养护的作用, 因其兼具陆地和海洋的特性, 被誉为“地球之肾”。湿地系统具有涵养水源、调节水资源分布、净化水质、调节气候等作用, 是很多陆地生态系统所不具备的优势特征^[24]。

湖北省神农架大九湖泥炭湿地是湿地生态系统的典型代表, 它对水环境变化敏感。本研究以它为对象, 采用涡度相关技术作为观测系统, 对大九湖

泥炭湿地水汽通量的变化以及相关环境影响因子进行长期仪器观测和记录,探究大九湖泥炭湿地水汽通量的特征及环境因子对其产生影响的差异,通过定位监测泥炭湿地生态系统对全球气候变化的响应,以期为大九湖泥炭湿地的保护及全球气候变化研究提供科学参考。

1 研究区自然概况

研究区位于湖北省西北部神农架林区神农架大九湖国家湿地公园内($31^{\circ}15' \sim 31^{\circ}75'N$ 、 $109^{\circ}56' \sim 110^{\circ}58'E$),平均海拔 1700 m,是以泥炭藓(*Sphagnum palustre* L.)为主的贫营养、亚高山泥炭地。该区为过渡性山地季风气候,年均温 $7.2^{\circ}C$,7月均温 $17.1^{\circ}C$,1月均温 $-2.4^{\circ}C$;年降水量 1528.3 mm,分布较均衡。作为华中地区最大的泥炭藓沼泽类湿地,该区对气候的影响较大。

通量观测塔安置在神农架大九湖国家湿地公园 3 号湖附近泥炭地中($31^{\circ}28'44.45"N$ 、 $110^{\circ}00'14.61"E$,海拔 1758 m),下垫面开阔平坦,属于典型的泥炭湿地生态系统。观测区泥炭藓生长量丰富,无乔木和灌木层。植被优势种为泥炭藓、大金发藓(*Polytrichum commune* Hedw)、湖北老鹳草(*Geranium rosthornii* R. Knuth)、紫羊茅(*Festuca rubra* L.)等^[25]。

2 研究方法

2.1 观测仪器安置

本研究主要利用涡度相关技术,采用开路式涡度相关观测系统(探头高度安装为 3 m)。主要仪器有:①开路式 CO_2/H_2O 分析仪(L1-7500, L1-COR, USA);②开路式 CH_4 分析仪(L1-7700, L1-Cor, USA);③三维超声风速仪(CAST3, L1-Cor, USA)。数据采集系统采用在线通量系统(CR1000, Campbell, USA)(采集频率为 10HZ),计算以下参数的平均值:①每 30 min 的水汽通量;②摩擦风速;③潜热通量;④显热通量。测算环境因子采用生物气象传感器系统(Biom-et100, L1-Cor, USA)(使用频率 10HZ),该系统主要用于收集环境因子数据,其记录规格为每 30 min 自动记录 1 次,并将其储存于 TF 卡上,后期可以导入测算分析结果。

2.2 数据处理

本研究采用 2017 年 12 月–2018 年 11 月共 12 个月内水汽通量观测的每 30 min 平均值数据。其中,2017 年 12 月–2018 年 2 月为冬季,2018 年 3–5 月为春季,6–8 月为夏季,9–11 月为秋季。

数据均为实地监测所得,由于数据会受到恶劣天气、湍流不充分等因素的影响,造成数据缺失和异常的现象,所以在数据分析中需要对异常数据进行剔除和插补,以保证研究的可持续性和研究结果的准确性。

异常数据的剔除采取以下 3 个步骤:第一,剔除同期所有的降雨数据,以保证数据的稳定性;第二,将异常值剔除,其异常值的选取要寻找差异性较大的数据;第三,选取摩擦风速临界值,将低于临界值的数据剔除,本研究中的临界值选取的是 0.15 m/s 。

H_2O 通量原始数据经过剔除后获得的为缺失部分时刻的有效数据,需要通过插补得到完整的 H_2O 通量有效数据。白天缺失的 H_2O 通量数据分为短时间和长时间两种情况:短时间是指低于 2 h 采集的通量数据,而超过 2 h 采集的通量数据被称为长时间。对于短时间缺失的数据一般采用平均昼夜变化法;长时间则要使用净辐射与水汽通量拟合的曲线来进行插补^[26–28]。对于夜间缺少的水汽通量数据则需要将缺失时刻左右相邻 5 d 的 H_2O 通量数据取平均值,赋予缺失的时刻。本研究最终得到的完整 H_2O 通量有效数据占原始数据的 53.53%,大于国际通量网的均值 35%,因此本研究 H_2O 通量数据有效。数据分析采用 SPSS 19.0 软件完成。由于本研究中通量数据、环境因子数据都属于连续型变量,所以选择 Pearson 法进行相关性检验。水汽通量和环境因子的关系通过二次拟合完成^[29]。图形绘制采用 Origin 8.5 软件完成。

3 结果与分析

3.1 主要环境因子月变化特征

本研究中涉及到的影响因素被称为环境因子,主要有:气温(T_a)、湿度、降水量、蒸散、净辐射(R_n)和饱和水汽压差(VPD),其中部分环境因子的月变化特征见表 1。

表 1 神农架大九湖泥炭湿地主要环境因子月变化特征
(2017.12–2018.11)

Table 1 Monthly changes in significant environmental factors in subalpine peat wetlands of Dajiuahu, Shennongjia (2017.12–2018.11)

月份 Month	气温 T_a ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 Humidity (%)	净辐射 R_n ($\times 10^3\text{W}/\text{m}^2$)	饱和水汽压差 VPD (Pa)
12	1.39	79.10	48.79	169.82
1	-1.04	77.67	34.45	297.98
2	-0.44	80.73	65.48	290.53
3	2.49	79.22	78.26	200.56
4	8.84	76.67	117.60	395.05
5	11.76	77.67	135.42	500.25
6	15.02	80.56	121.52	404.54
7	19.06	77.05	162.45	477.43
8	18.29	81.27	125.09	443.66
9	13.82	79.53	135.49	568.88
10	8.76	82.00	91.91	264.21
11	3.63	79.32	54.54	207.24

注：气温、湿度、饱和水汽压差为月平均值；净辐射为全年总量。下同。

Notes: Air temperature, humidity, and vapor pressure deficit are monthly average data; precipitation, evapotranspiration, and net radiation are monthly total data. T_a , air temperature; VPD, vapor pressure deficit; R_n , net radiation. Same below.

从表 1 可见，该湿地系统月平均温度变化幅度较大，最低温和最高温产生的月份与低海拔地区基本一致。夏季(6–8 月)平均气温显著高于其他季节；月平均湿度的变化幅度不大，总体在 76.67% ~ 82.00%；大九湖泥炭湿地全年的净辐射为 $1171 \times 10^3\text{W}/\text{m}^2$ ，月平均变化幅度较大，其中夏季(6–8 月)最大，为 $409.06 \times 10^3\text{W}/\text{m}^2$ ，占全年净辐射的 34.96%；VPD 全年变化较大，VPD 最大为 568.88 Pa (2018 年 9 月)，最小值为 169.82 Pa(2017 年 12 月)，在一年中 VPD 呈先增后减的趋势(春夏季高，秋冬季低)。

3.2 蒸散量、降水量变化特征

在水循环研究中，降水量和蒸散量是重要贡献

表 2 神农架大九湖泥炭湿地各季节降水量和蒸散量分布特征(2017.12–2018.11)

Table 2 Distribution characteristics of precipitation and evapotranspiration for each season in subalpine peat wetlands of Dajiuahu, Shennongjia (2017.12–2018.11)

季节 Season	月份 Month	降水 Precipitation		蒸散量 Evapotranspiration	
		降水量 (mm)	占全年比例 (%)	降水量 (mm)	占全年比例 (%)
冬季 Winter	12–2 月	126.24	6.49	111.55	9.79
春季 Spring	3–5 月	491.6	25.29	315.82	27.73
夏季 Summer	6–8 月	903.31	46.46	448.57	39.38
秋季 Autumn	9–11 月	422.96	21.76	263.09	23.10
全年 All year		1944.11	100	1139.03	100

因子，蒸散量是指水汽通量的总和^[30]，是生态系统碳、水、能量循环的主要枢纽^[31]。从大九湖泥炭湿地 2017 年 12 月–2018 年 11 月降水量和蒸散量的月统计结果来看(图 1)，降水量和蒸散量都呈现春夏季多、秋冬季少的规律，降水和蒸散最大值均出现在 7 月，且降水量远大于蒸散量，这与 7、8 月份大九湖的雨季有关。除 2017 年 12 月和 2018 年 10 月外，其它各月份的降水量均大于蒸散量。

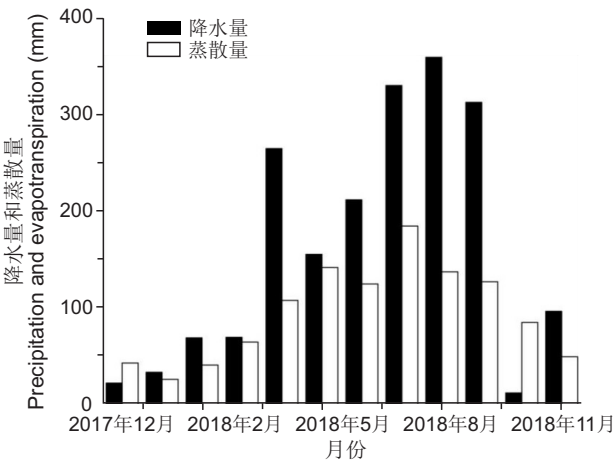


图 1 神农架大九湖泥炭湿地各月份降水量与蒸散量
(2017.12–2018.11)

Fig. 1 Monthly precipitation and evapotranspiration in subalpine peat wetlands of Dajiuahu, Shennongjia (2017.12–2018.11)

将大九湖泥炭湿地 2017 年 12 月–2018 年 11 月的降水量、蒸散量按季节进行统计，结果显示(表 2)，夏季降水量最大，占全年降水量的 46.46%；春季和秋季降水量比较接近，分别占全年降水量的 25.29%和 21.76%；冬季降水量最少，只占全年的 6.49%。大九湖泥炭湿地的蒸散量在各季节间的差异相对较小，夏季蒸散量最大，占全年蒸散量的 39.38%；春季和秋季蒸散量差异不大，分别占全年蒸散量的 27.73%和 23.10%；冬季

蒸散量最少，只占全年的 9.79%。大九湖泥炭湿地蒸散量的季节变化幅度要小于降水量的季节变化幅度。

3.3 水汽通量变化特征

3.3.1 水汽通量各月日平均变化

对神农架大九湖泥炭湿地 2017 年 12 月 – 2018 年 11 月的水汽通量按各月份日平均变化进行统计，结果显示(图 2)，全年水汽通量各月份日平均峰值在 0.89~5.45 mmol·s⁻¹·m⁻²之间，集中出现在 12：00 时左右。最大值出现在 7 月，最小值出现在 1 月，这与各月份间气温和辐射量的差异相一致。水汽通量各月份日平均最小值在 -0.88~0.37 mmol·s⁻¹·m⁻²之间，且各月份间的差异不明显。

大九湖泥炭湿地全年各月份各时刻的水汽通量在 -2.6~5.69 mmol·s⁻¹·m⁻²之间，大多为正值，即释放水汽，表明大九湖泥炭湿地总体表现为水汽源。从图 2 可看出，该湿地水汽通量各月份日均变化呈有规律的单峰曲线变化特征，在 11：30~

13：00 时水汽通量达到最大，表明此时温度最高、辐射最强，而到了 14：00 时，随着温度不断下降，水汽通量随着辐射的降低而下降。在 17：30~19：00 时维持在 0 左右，到了夜间水汽通量变化较稳定，说明夜间气温、辐射量等因素对水汽通量的影响较小^[32]。此外，2018 年 3–11 月，水汽通量日均峰值均出现明显的上下波动。5–10 月份的日均水汽通量变化较其他月份波动更大、峰值也较高。

3.3.2 水汽通量的季节周期变化

从神农架大九湖泥炭湿地水汽通量的季节日平均变化来看(图 3)，各季节日平均变化范围在 -0.47~4.68 mmol·s⁻¹·m⁻²之间，最大值出现在夏季，最小值出现在冬季。从季节变化来看，夏季水汽通量日平均变化幅度最大，7：00 时水汽通量开始增加，到 12：00~13：00 时达到峰值，并在此后开始降低，到 20：30 时左右维持在 0 附近。春秋两季的日平均变化幅度较一致，但变化幅度大于冬季，这可能是因为这两季植物处在生长和衰落

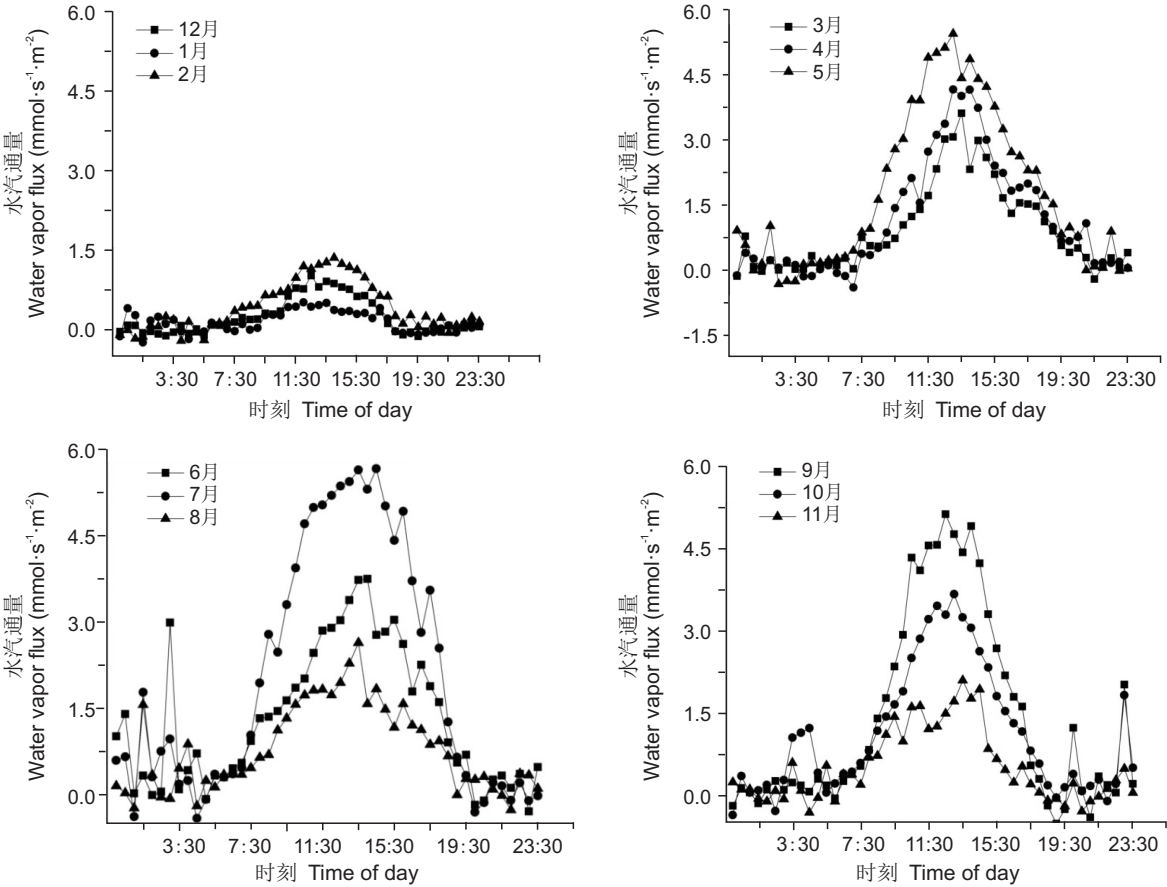


图 2 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量各月份日均变化曲线(2017.12–2018.11)
Fig. 2 Mean diurnal variation of monthly water vapor flux in subalpine peat wetlands of Dajiuahu, Shennongjia (2017.12–2018.11)

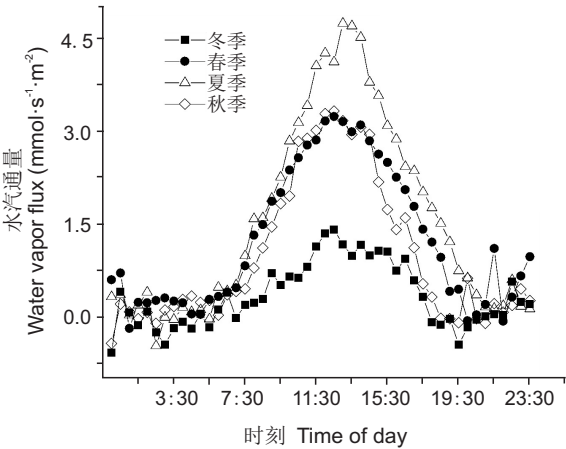
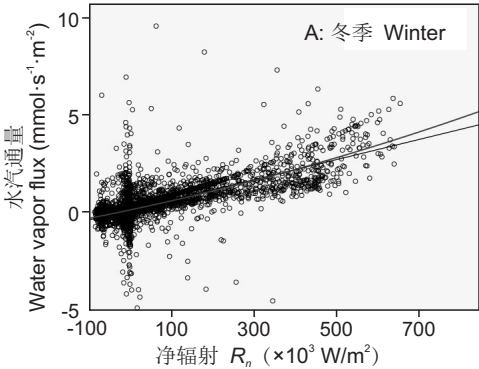


图 3 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量各季节日平均变化曲线 (2017.12–2018.11)

Fig. 3 Mean diurnal variation of water vapor flux for each season in subalpine peat wetlands of Dajihu, Shennongjia (2017.12–2018.11)

的过程中^[21]。冬季水汽通量的日平均变化幅度明显小于春、夏、秋 3 个季节, 变化幅度为 $0.08 \sim 1.39 \text{ mmol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 而且冬季的日平均变化曲线没有明显的峰值且白天有明显的波动。

$y = 3.55 \times 10^{-3}x^2 + 4.4 \times 10^{-3}x + 0.2255, R^2 = 0.4468$



3.4 相关环境因子与水汽通量的相关性

3.4.1 净辐射 (R_n) 与水汽通量的相关性

在湿地生态系统中影响较大的环境因子是地表 R_n , 净辐射是控制大气感热能和潜热能的重要因素^[33]。通过对大九湖泥炭湿地 2017 年 12 月–2018 年 11 月的水汽通量和 R_n 的相关性检验, 并按照季节进行一元二次曲线拟合, 结果显示 (表 3, 图 4), 大九湖泥炭湿地生态系统各季节的水汽通量与净辐射显著相关。从图 4 来看, 各季节

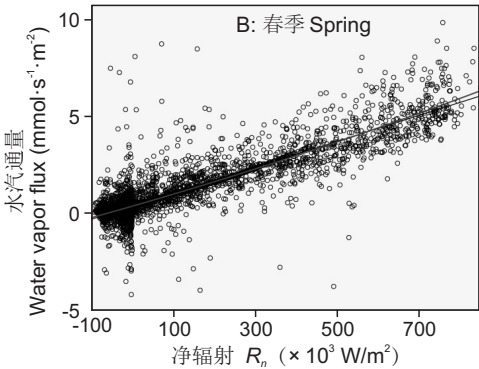
表 3 神农架大九湖泥炭湿地各季节净辐射 (R_n) 与水汽通量的相关性检验

Table 3 Correlations between net radiation (R_n) and water vapor flux in subalpine peat wetlands of Dajihu, Shennongjia, in different seasons

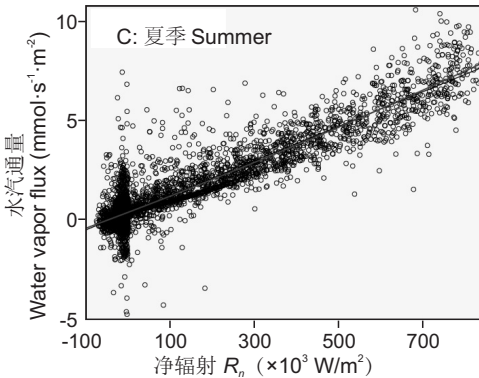
季节 Seasons	净辐射 R_n
冬季 (12–2 月)	0.668 **
春季 (3–5 月)	0.875 **
夏季 (6–8 月)	0.913 **
秋季 (9–11 月)	0.870 **

Note: **, $P < 0.01$. Same below.

$y = 2.72 \times 10^{-3}x^2 + 6.1 \times 10^{-3}x + 0.3793, R^2 = 0.7664$



$y = 2.56 \times 10^{-3}x^2 + 8 \times 10^{-3}x + 0.4507, R^2 = 0.8347$



$y = 1.03 \times 10^{-2}x^2 + 5 \times 10^{-3}x + 0.36201, R^2 = 0.7625$

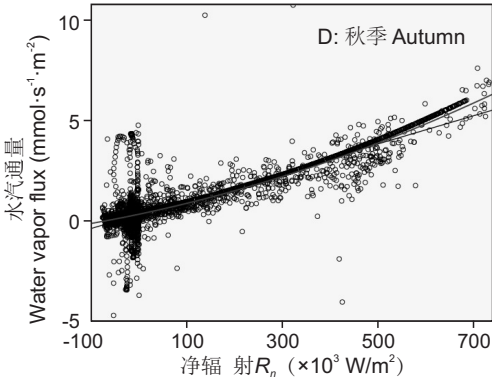


图 4 神农架大九湖泥炭湿地各季节水汽通量与净辐射 (R_n) 的拟合曲线

Fig. 4 Fitted curve relationships between water vapor flux and net radiation (R_n) in subalpine peat wetlands of Dajihu, Shennongjia, in different seasons

的水汽通量和 R_n 采用一元二次方程的拟合效果更好，春季(3–5月)、夏季(6–8月)和秋季(9–11月)的拟合度更高， R^2 分别为 0.7664、0.8347 和 0.7625，而冬季(12–2月)拟合度较差， R^2 仅为 0.4468。

3.4.2 气温 (T_a) 与水汽通量的相关性

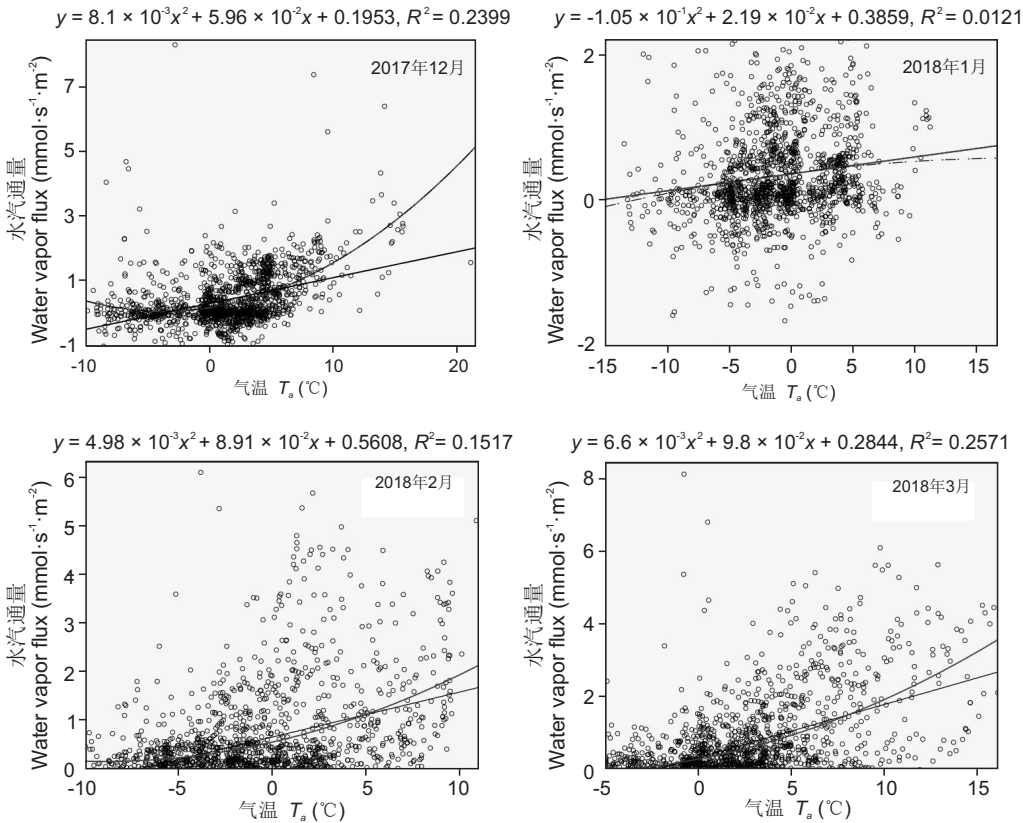
气温与水汽通量有着密切的关系，较高的温度会增加汽化的效率，增加水汽输送频率。此外，温度变化也会影响气压等环境因子，间接影响水汽的输送^[34]。通过对神农架大九湖泥炭湿地水汽通量和 T_a 的相关性检验，并按照月份进行二次拟合，结果显示(表 4，图 5)，大九湖泥炭湿地生态系统各季节的水汽通量与气温显著相关。根据拟合结果，选择一元二次拟合曲线作为最优结果并进行分析。

从图 5 可看出，各月份的水汽通量与气温均呈显著相关，其中 2018 年 7 月的拟合效果最好 ($R^2 = 0.6451$)，2018 年 1 月的拟合效果较差。水汽通量和气温的拟合效果各月份间的差异较大，5–10 月的拟合效果明显高于其他月份。

表 4 神农架大九湖泥炭湿地各月份气温 (T_a) 与水汽通量的相关性检验
Table 4 Correlations between air temperature (T_a) and water vapor flux in subalpine peat wetlands of Dajihu, Shennongjia, in different seasons

月份 Month	气温 T_a
12 月	0.399 **
1 月	0.109 **
2 月	0.371 **
3 月	0.486 **
4 月	0.586 **
5 月	0.699 **
6 月	0.650 **
7 月	0.700 **
8 月	0.722 **
9 月	0.522 **
10 月	0.679 **
11 月	0.543 **

将大九湖泥炭湿地生态系统 2017 年 12 月–2018 年 11 月的水汽通量和气温按季节进行拟合，结果显示(图 6)，夏季(2018 年 6–8 月)的拟合效果最佳 ($R^2 = 0.5462$)，超过 50%。春、秋、冬季的拟合效果较差。



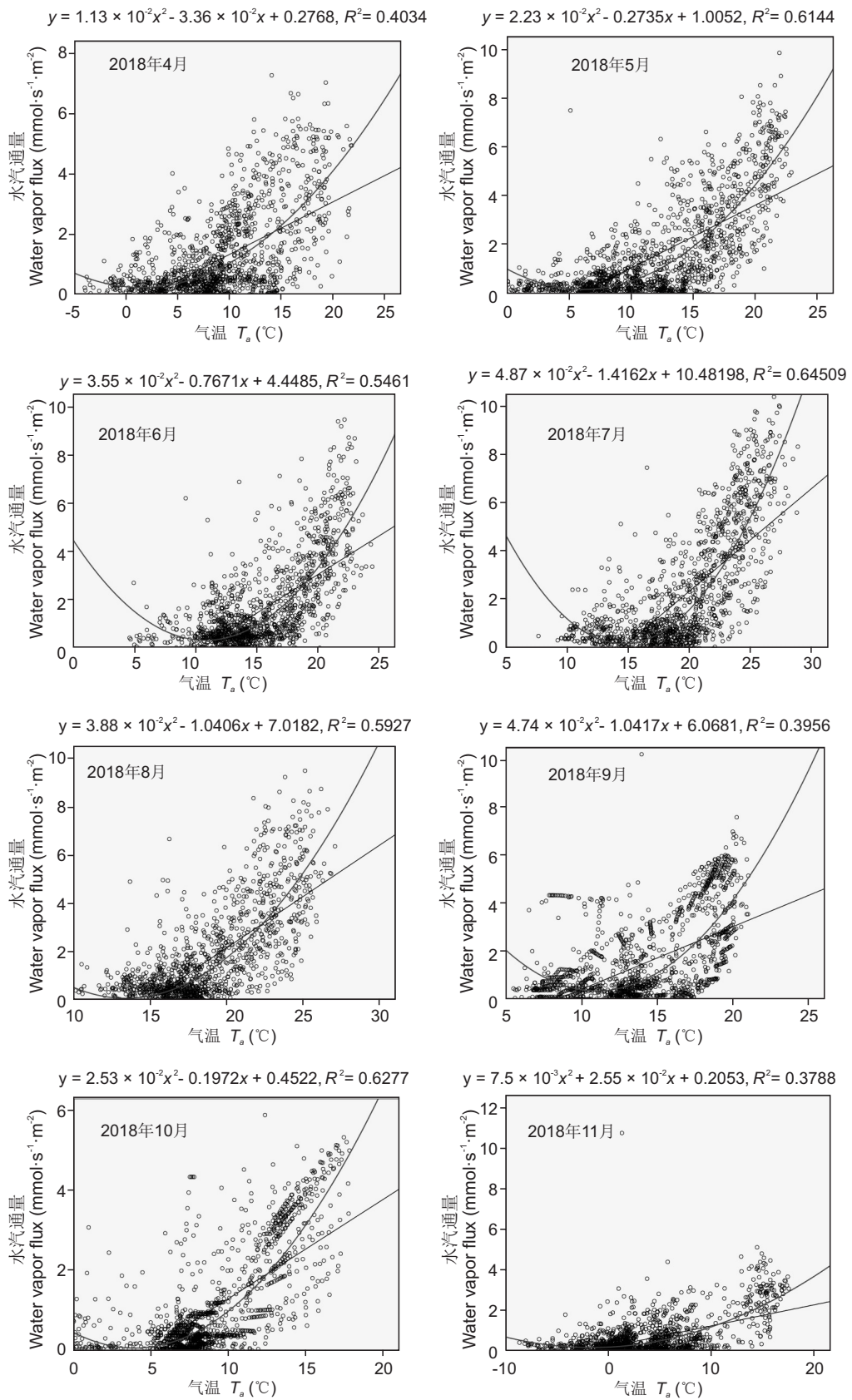


图 5 神农架大九湖泥炭湿地各月水汽通量与气温 (T_a) 的拟合曲线 (2017.12–2018.11)
Fig. 5 Fitted curve relationships between water vapor flux and air temperature (T_a) in subalpine peat wetlands of Dajihu, Shennongjia, in different months (2017.12–2018.11)

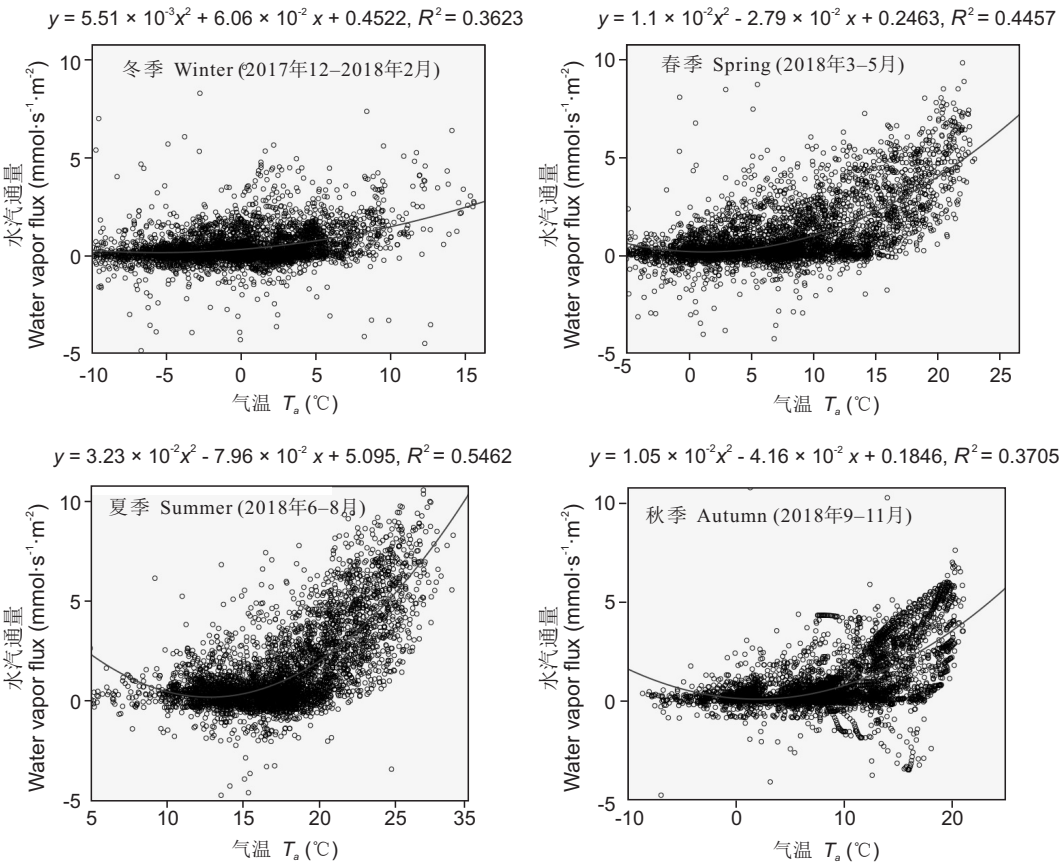


图 6 神农架大九湖泥炭湿各季节水汽通量与气温 (T_a) 的拟合曲线 (2017.12–2018.11)
Fig. 6 Fitted curve relationships between water vapor flux and air temperature (T_a) in subalpine peat wetlands of Dajiuhu, Shennongjia, in different seasons (2017.12–2018.11)

3. 4. 3 净辐射 (R_n)、气温 (T_a) 与水汽通量的相关性

热量是影响大九湖泥炭湿地生态系统水汽输送的因子之一，热量的强弱直接影响水汽通量的大小。 R_n 和 T_a 是影响最大的两个热量因素，比较 R_n 和 T_a 影响水汽通量的差异性对认识热量因子对泥炭湿地的影响有着积极作用^[21, 35]。通过对大九湖泥炭湿地 R_n 、 T_a 与水汽通量按季节进行主成分相关分析，结果显示(表 5)， T_a 在春、夏、秋 3 个季节对水汽通量的影响都显著，但是冬季 T_a 与水汽通量的相关性明显小于其他季节。 R_n 在各季节对水汽通量的影响都显著，且夏季最显著。

将大九湖泥炭湿地生态系统 2017 年 12 月–2018 年 11 月的 R_n 、 T_a 按季节与水汽通量季节数据进行多项式回归方程拟合，得到如下回归方程，显示各季节的相关性均显著。

冬季：水汽通量 = $0.00508R_n - 0.00604T_a +$

$0.22072(R^2 = 0.447^*)$ ；
春季：水汽通量 = $0.00603R_n + 0.04277T_a + 0.12072(R^2 = 0.78401^*)$ ；
夏季：水汽通量 = $0.00822R_n + 0.03581T_a - 0.12934(R^2 = 0.83669^*)$ ；
秋季：水汽通量 = $0.00677R_n + 0.01443T_a + 0.24911(R^2 = 0.75982^*)$ 。

表 5 净辐射 (R_n)、气温 (T_a) 与水汽通量季节数据的相关性
Table 5 Correlation analysis of water vapor flux, net radiation (R_n), and air temperature (T_a) based on seasonal data

季节 Seasons	净辐射 R_n	气温 T_a
冬 Winter	0.66832 *	0.28764 *
春 Spring	0.8749 *	0.59341 *
夏 Summer	0.91331 *	0.64942 *
秋 Autumn	0.87047 *	0.53334 *

Note: *, $P < 0.05$.

4 讨论

4.1 蒸散量和降水量特征

不同的生态系统有着不同的降水量和蒸散量。本研究表明,大九湖泥炭湿地夏季降水量最大,占全年降水量的 46.46%;蒸散量在各季节间的差异相对较小,夏季蒸散量最大,占全年蒸散量的 39.38%。蒸散量的季节变化幅度要小于降水量的季节变化幅度。通过与相似纬度且气候接近的其他 6 个地区的年均降水量、蒸散量进行对比,结果发现(表 6),本研究区大九湖泥炭湿地的降水量和蒸散量在 7 个地区中均为最大,其蒸散量占降水量的 58.59%,这与大九湖泥炭湿地长期处于湿润状态有关。其他 6 个地区中仅江苏常熟水稻农田的蒸散量(67.91%)高于大九湖,这可能是因为水稻农田常年处于积水状态,植被覆盖低,水分蒸发快,所以相应蒸散量占比较高。本研究与彭凤娇^[21]、郭瑞萍等^[36]的研究结果一致,即湿地的蒸散量最大,然后依次是森林、农田、草地等。

4.2 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量的变化特征

神农架大九湖泥炭湿地全年各月份日均水汽通量大多为正值,范围在-2.66~5.69 mmol·s⁻¹·m⁻²之间,即释放水汽,大九湖泥炭湿地总体表现为水汽源,呈现明显的单峰曲线,一般在 11:30~13:30 达到峰值,并且在某些月份中,日均峰值区域水汽通

量会明显下降。这与牛晓栋等^[22]、彭凤娇等^[21]分别对天目山常绿落叶阔叶林和大九湖泥炭湿地的水汽通量研究结果一致。有研究表明,气温和太阳辐射会使植物的蒸腾作用增强或减弱,从而使水汽通量日变化呈现出单峰的规律。而峰值区域出现的水汽通量明显下降的原因可能是当气温和辐射升高到一定程度后,植物失水严重而关闭气孔以保持水分,导致蒸腾作用在某一时刻明显下降。另外,本研究结果表明(图 2),大九湖泥炭湿地 5-10 月份的日均水汽通量变化较其他月份明显波动更大、峰值也较高,而 11-2 月日均水汽通量的变化幅度较小。这是因为 5-10 月研究区域白天气温较高,辐射量较大、昼夜温差大,导致水汽通量昼夜的波动较大;而 11-2 月为冬季,降雪天增多,加上植物枯萎,使得植物蒸腾作用和地表蒸发作用都变得很微弱,所以水汽通量的变化幅度也减小。

从季节变化特征上,夏季水汽通量日均变化幅度最大。春秋两季的日均变化幅度比较一致,但变化幅度大于冬季。这是因为冬季大九湖湿地降雪较多,气温较低,蒸腾和蒸发作用十分微弱。本研究结果与全艳嫦等^[34]对城市草坪水汽通量特征的研究一致。本实验室前期研究发现,大九湖湿地冬季水汽通量日均变化在某时间段中,变化幅度不平滑,波动较频繁^[20],这是因为冬季气候多变,水汽通量很容易受到各类因素的干扰,导致水汽通量曲线幅度变化频繁。

表 6 7 个不同生态系统年均蒸散量对比
Table 6 Comparison of rainfall evapotranspiration among seven different ecosystems

地点 Location	生态系统类型 Ecosystem type	观测时间 Observation time (years)	降水量 Precipitation (mm)	蒸散量 Evapotranspiration (mm)	所占比例 Proportion (%)	文献来源 Resource
江苏常熟 Changshu Jiangsu	水稻农田 Rice field	1990-2003	1038	705	67.91	[36]
浙江太湖源 Taihuyuan Zhejiang	雷竹林 Bamboo forest	2010-2011	1201.72	669.84	55.61	[37]
湖南君山 Junshan Hunan	杨树人工林 Poplar forest	2013	1675.00	906.66	55.74	[4]
浙江天目山 Tianmushan Zhejiang	常绿阔叶混交林 Mixed evergreen broad-leaf forest	2013-2014	1401.70	721.30	54.12	[14]
江西千烟洲 Qianyanzhou Jiangxi	人工针叶林 Artificial coniferous forest	2004	1323.60	736.10	51.46	[35]
浙江安吉 Anji Zhejiang	毛竹林 Bamboo forest	2014	1543.10	744.73	48.26	[28]
神农架大九湖 Shennongjia Dajihu	泥炭藓湿地 Sphagnum wetland	2017-2018	1944.11	1139.03	58.59	本文

4.3 净辐射与水汽通量的关系

从水汽通量与地表 R_n 季节变化的曲线拟合结果显示(图4),大九湖泥炭湿地各季节的 R_n 与水汽通量均呈显著相关,春季、夏季和秋季的拟合结果(R^2)均超过0.7,夏季最高达0.8347。前人对不同区域水汽通量的相关研究表明,海南岛橡胶林的 R^2 最大值为0.7604,出现在雨季(5–10月)^[15];竹林的 R^2 最大值出现在夏季(0.6111);江西千烟洲的 R^2 最大值为0.554,出现在夏季^[35],而本研究大九湖泥炭湿地 R^2 最大值(0.8347)要远大于上述相似区域。海南岛橡胶林^[15]、浙江太湖源雷竹林^[37]、天目山常绿落叶阔叶混交林^[22]和安吉毛竹林^[28]冬季 R^2 值分别为0.2903、0.0718、0.1256和0.0455,而大九湖冬季 R^2 值为0.4468,表明冬季大九湖的拟合效果要远好于相似地区。从季节差异上来看,大九湖冬季水汽通量与 R_n 的拟合效果明显差于其他3个季节,这与张晓娟等^[15]、彭凤娇等^[21]分别对海南岛橡胶林生态系统和神农架大九湖的研究结果一致。这是因为冬季气候条件不稳定,天气多变,水汽通量受其他因素的影响较多,加上积雪覆盖,植物枯萎,生态系统内蒸腾作用降到最低,导致其与净辐射相关性较差。

大九湖属于亚高山湿地,海拔较高,辐射较强烈,强辐射可以使植物叶片温度高出气温2~10℃,增大了叶片水汽扩散梯度并促使气孔开放,植物水分蒸腾作用加强,这也是大九湖湿地水汽通量与 R_n 各季节的拟合效果均好于其他相似区域的原因之一。

4.4 气温与水汽通量的关系

大九湖湿地水汽通量与气温的拟合效果各月份的差异较大,5–10月的拟合效果(R^2)明显高于其他月份。这是因为5–10月气温明显高于他月份,并且气温的变化幅度也比较稳定,温度升高会影响植被的蒸腾作用和水分的蒸发速率,所以相应的气温与水汽通量的相关性也较强,这与全艳嫦等^[34]、万志红等^[38]分别对城市草坪生态系统和锦州地区玉米农田生态系统研究得出的水汽通量随太阳辐射的大小而变化的结果一致。本研究中,2017年12月–2018年4月以及2018年11月的水汽通量与气温的拟合效果不佳,这可能与气温变化幅度较大、气候多变、影响水汽通量的因素复杂

多样等因素有关,这也与张晓娟等^[15]、全艳嫦等^[34]分别对海南岛橡胶林和城市草坪的研究结果一致。

在季节尺度上,气温与水汽通量夏季(2018年6–8月)的拟合效果最佳,超过50%($R^2 = 0.5462$),相关性较好,而春、秋、冬季水汽通量与气温的相关性较小。因为夏季气温较其他月份高并且气温的变化幅度也较稳定,温度高会影响植被的蒸腾作用和水分的蒸发速率,所以气温与水汽通量的相关性较高。这也与全艳嫦等^[34]的研究结果一致。

4.5 净辐射(R_n)和气温(T_a)对水汽通量影响的差异

本研究中, R_n 在各季节对水汽通量的影响都显著,且夏季最为显著,这是因为 R_n 在水汽输送过程具有决定性作用。同样 T_a 在春、夏、秋3个季节对水汽通量的影响也都显著,且夏季最为显著,神农架冬季净辐射与水汽通量的相关性要明显比其他研究区域显著,如张晓娟等^[19]在海南岛橡胶林得出的冬季净辐射和水汽通量的相关性为0.46。但是冬季 T_a 与水汽通量的相关性明显小于其他季节,可能与冬季降雪较多、气候复杂、水汽通量影响因素较多有关,冬季 T_a 成为水汽通量的弱影响因子,不能直接决定水汽的输送过程。这与本实验室前期对大九湖湿地的相关研究结果^[20]一致。对比 R_n 和 T_a 两者影响水汽通量的差异性可知,二者对水汽通量的影响均为显著,但是 R_n 在各季节上的相关系数要大于 T_a ,且在季节上也有差异。 R_n 在各个季节对水汽通量均保持一定的影响程度,而 T_a 在冬季对水汽通量的影响则明显小于其他季节,冬季主要是依靠 R_n 影响水汽通量。春夏两季, R_n 和 T_a 均为重要影响因子,而秋冬两季, T_a 对水汽通量的影响较弱,主要影响因子来自 R_n 。总体来说, R_n 在大九湖泥炭湿地生态系统水汽循环中的作用要大于 T_a 。

相关研究表明, R_n 和 T_a 均为热量影响因素,热量主要影响水汽从地面向空气输送的过程,此过程也是一个能量迁移的过程^[22,35]。大九湖泥炭湿地属于亚高山湿地,接收的太阳辐射较强,所以 R_n 是影响地面热量的最主要因素之一。而 T_a 在正常季节也能使地面能量增加,但遇恶劣天气,比如大九湖冬季积雪覆盖时, T_a 对地表的影响就会减

弱。总体来看, 相比 T_a , R_n 才是影响水汽输送过程最主要的因素。

参考文献:

- [1] 欧阳峰, 陆一新, 黄冬梅. 水污染造成的环境经济损失分析[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(1): 33–36.
Ouyang F, Lu YX, Huang DM. Analysis of environmental economic loss due to water pollution[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2006, 13(1): 33–36.
- [2] Baldocchi D, Falge E, Gu L, Olson R, Hollinger D, Running S, *et al.* FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(11): 2415–2434.
- [3] 吴方涛, 曹生奎, 曹广超, 汉光昭, 林阳阳, 等. 青海湖2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统水热通量比较[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 176–182.
Wu FT, Cao SK, Cao GC, Han GZ, Lin YY, *et al.* Comparative study on hydrothermal fluxes of two alpine *Kobresia* wet meadow wetland ecosystems in Qinghai Lake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5): 176–182.
- [4] 高升华, 汤玉喜, 唐洁, 唐学君, 田甜, 等. 滩地杨树人工林皆伐后蒸发散与产流变化[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 486–493.
Gao SH, Tang YX, Tang J, Tang XJ, Tian T, *et al.* Variations of evapotranspiration and water yield in a post-clearcutting riparian poplar plantation[J]. *Forest Research*, 2017, 30(3): 486–493.
- [5] Chatterjee D, Nayak AK, Vijayakumar S, Debnath M, Chatterjee S, *et al.* Water vapor flux in tropical lowland rice[J]. *Environ Monit Assess*, 2019, 191(9): 550.
- [6] 王慧清, 付亚男, 包福祥, 孟雪峰. 内蒙古地区多年大气可降水量及其转化效率研究[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 786–795.
Wang HQ, Fu YN, Bao FX, Meng XF. Study on atmospheric precipitable water and precipitation conversion efficiency of multi-year in Inner Mongolia[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(3): 786–795.
- [7] Twine TE, Kustas WP, Norman JM, Cook DR, Houser PR, *et al.* Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. *Agr Forest Meteorol*, 2000, 103(3): 279–300.
- [8] 李小梅, 张秋良. 环境因子对兴安落叶松林生态系统 CO_2 通量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 31–39.
Li XM, Zhang QL. Impact of climate factors on CO_2 flux characteristics in a *Larix gmelinii* forest ecosystem[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(8): 31–39.
- [9] 宋长春, 阎百兴, 王跃思, 王毅勇, 姜彦景, 等. 三江平原沼泽湿地 CO_2 和 CH_4 通量及影响因子[J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2473–2477.
- [10] 吴方涛, 曹生奎, 曹广超, 汉光昭, 林阳阳, 等. 青海湖高寒藏嵩草湿草甸湿地生态系统 CO_2 通量变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(2): 123–131.
Wu FT, Cao SK, Cao GC, Han GZ, Lin YY, *et al.* Variation of CO_2 flux of alpine wetland ecosystem of *Kobresia tibetica* wet meadow in Lake Qinghai[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(2): 123–131.
- [11] Srinivasa RP, Kambhammettu BP. Dynamics of crop coefficients for citrus orchards of central India using water balance and eddy covariance flux partition techniques[J]. *Agr Water Manage*, 2019, 212: 68–77.
- [12] Coates TW, Flesch TK, McGinn SM, Charmley E, Chen D. Evaluating an eddy covariance technique to estimate point-source emissions and its potential application to grazing cattle[J]. *Agr Forest Meteorol*, 2017, 234: 164–171.
- [13] Aouade G, Ezzahar J, Amenouz N, Er-Raki S, Benkaddour A, *et al.* Eddy covariance system and meteorological measurements for partitioning evapotranspiration, of winter wheat, into soil evaporation and plant transpiration in a semi-arid region[J]. *Agr Water Manage*, 2016, 177: 181–192.
- [14] 孙恒. 天目山常绿落叶阔叶混交林碳水通量及能量通量的特征研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2017.
- [15] 张晓娟, 吴志祥, 杨川, 管利民. 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 XJ, Wu ZX, Yang C, Guan LM. 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.
- [16] Neilson RP, King GA, Koerper G. Toward a rule-based biome mode[J]. *Landscape Ecol*, 1992, 7(1): 27–43.
- [17] Hetherington AM, Woodward FI. The role of stomata in sensing and driving environmental change[J]. *Nature*, 2003, 424(6951): 901–908.
- [18] 王妍. 长江中下游滩地抑螺防病林生态系统碳水通量及碳储量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [19] 曹生奎, 曹广超, 陈克龙, 冯起, 李忠勤, 等. 青海湖高寒湿地生态系统 CO_2 通量和水汽通量间的耦合关系[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1286–1295.
Cao SK, Cao GC, Chen KL, Feng Q, Li ZQ, *et al.* Coupling relationships between alpine wetland ecosystem CO_2 and vapor fluxes around the Qinghai Lake[J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(5): 1286–1295.
- [20] 李金群, 葛继稳, 彭凤姣, 李艳元, 周颖, 等. 大九湖泥炭湿地生态系统碳水通量及水分利用效率研究[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(1): 14–25.
Li JQ, Ge JW, Peng FJ, Li YY, Zhou Y, *et al.* Studies on carbon-water flux and water use efficiency in Dajiuhe peat wetland ecosystem[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2019, 26(1): 14–25.
- [21] 彭凤姣, 葛继稳, 李永福, 李艳元, 程腊梅, 等. 神农架大九湖泥炭湿地水汽通量特征及生态意义[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(5): 1–8, 59.
Peng FJ, Ge JW, Li YF, Li YY, Cheng LM, *et al.* Charac-

- teristics of water vapor flux and their ecological significance in the peat wetlands of Dajihu, Shennongjia [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(5): 1–8, 59.
- [22] 牛晓栋, 江洪, 方成圆, 陈晓峰, 孙恒. 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 XD, Jiang H, Fang CY, Chen XF, Sun H, *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.
- [23] 杨丽, 李春宇, 余绍文, 刘德良. 湿地生态完整性评价方法研究进展[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(4): 1–4.
- Yang L, Li CY, Yu SW, Liu DL. Progress in research of assessment methods for measuring the ecological integrity of wetlands [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2008, 15(4): 1–4.
- [24] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 等. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 478–488.
- Li HD, Guang DX, Yuan FH, Wang AZ, Jin CJ, *et al.* Water use efficiency and its influential factor over Horqin meadow [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 478–488.
- [25] 周文昌, 史玉虎, 崔鸿侠, 张志麒, 杨敬元. 神农架大九湖湿地保护与管理对策[J]. 湿地科学与管理, 2017, 13(2): 34–37.
- Zhou WC, Shi YH, Cui HX, Zhang ZL, Yang JY. The countermeasures for protection and management of Dajiu Lake wetland in Shennongjia [J]. *Wetland Science & Management*, 2017, 13(2): 34–37.
- [26] 陈文婧. 城市绿地生态系统碳水通量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [27] 谢琰, 文军, 刘蓉, 王欣, 贾东于. 太阳辐射和水汽压差对黄河源区高寒湿地潜热通量的影响研究[J]. 高原气象, 2018, 37(3): 614–625.
- Xie Y, Wen J, Liu R, Wang X, Jia DY. The role of solar radiation and water vapor pressure deficit on controlling latent heat flux density over the alpine wetland of the source region of the Yellow River [J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(3): 614–625.
- [28] 刘玉莉. 安吉毛竹林和太湖源雷竹林碳水耦合及水分利用效率研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [29] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳, 乔冬梅, 李中阳, 等. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 85–92.
- Huang ZD, Qi XB, Fan XY, Qiao DM, Li ZY, *et al.* Impact of rainfall and evapotranspiration on irrigation requirement of summer maize [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 85–92.
- [30] Soubie R, Heinesch B, Granier A, Aubinet M, Vincke C. Evapotranspiration assessment of a mixed temperate forest by four methods: eddy covariance, soil water budget, analytical and model [J]. *Agr Forest Meteorol*, 2016 (228): 191–204.
- [31] Allen RG, Pereira LS, Howell TA, Jensen ME. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy [J]. *Agr Water Manage*, 2011, 98 (6): 899–920.
- [32] 高扬宇, 何洪林, 张黎, 路倩倩, 于贵瑞, 等. 近50年中国地表净辐射的时空变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(1): 1–10.
- Gao YZ, He HL, Zhang L, Lu QQ, Yu GR, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics of surface net radiation in China over the past 50 years [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(1): 1–10.
- [33] 王雷, 刘辉志, David Schaffrath, Christian Bernhofer. 内蒙古羊草和大针茅草原下垫面水汽、CO₂ 通量输送特征[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 605–613.
- Wang L, Liu HZ, David Schaffrath, Christian Bernhofer. Transfer characteristics of water vapor and CO₂ flux over *Leymus chinensis* and *Stipa grandis* steppe surfaces in Inner Mongolia [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(3): 605–613.
- [34] 全艳嫦. 城市草坪水汽通量与蒸散量的变化特征分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [35] 李菊, 刘允芬, 杨晓光, 李俊. 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.
- Li J, Liu YF, Yang XG, Li J. Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, (26)8: 2449–2456.
- [36] 郭瑞萍, 莫兴国. 森林、草地和农田典型植被蒸散量的差异[J]. 应用生态学报, 2007(8): 1751–1757.
- Guo RP, Mo XG. Differences of evapotranspiration on forest, grassland and farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007(8): 1751–1757.
- [37] 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 EJ, Jiang H, Chen YF. 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.
- [38] 万志红, 李荣平, 周广胜, 王莹, 王婉昭, 等. 锦州地区玉米农田生态系统水汽通量变化特征及其调控机制[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 155–159.
- Wan ZH, Li RP, Zhou GS, Wang Y, Wang WZ, *et al.* Variation characteristics and regulation mechanisms of water vapor flux over a rain-fed maize farmland ecosystem in Jinzhou [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2016, 32(6): 155–159.