

神农架大九湖泥炭湿地能量通量及平衡分析

周颖^{1,2,3}, 葛继稳^{1,2,3}, 彭凤姣⁴, 李艳元⁴, 李金群^{1,2,3}, 李永福^{1,2,3}, 翁闻畅^{1,2,3}

(1. 中国地质大学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. 中国地质大学生态环境研究所, 武汉 430074;

4. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要: 研究大九湖泥炭湿地通量, 为准确评估泥炭地生态系统与大气间的物质和能量交换提供基础数据。利用涡度相关系统对神农架大九湖 2015 年 9 月~2016 年 8 月的净辐射、显热通量、潜热通量及土壤热通量进行了为期 1 年的连续观测。结果表明: 1) 泥炭地全年净辐射为 3 146.91 MJ/m², 显热通量为 931.79 MJ/m², 潜热通量为 1 762.40 MJ/m², 土壤热通量为 22.26 MJ/m²; 能量分配主要以潜热为主, 占净辐射的 56%。潜热通量为能量散失的主要形式, 土壤表现为热汇。2) 各能量分量季节变化明显, 10 月、1 月、4 月及 7 月的日变化均以净辐射为基础, 呈相似的单峰型曲线变化。3) 波文比逐月变化不规律, 月平均波文比为 0.65、波动在 0.34~1.06, 年波文比为 0.53, 全年能量分配潜热通量大于显热通量。4) 神农架大九湖泥炭地年能量闭合度为 0.86, 存在 14% 的能量不闭合。不闭合的原因可能与下垫面状况、季节变化及平流的影响产生的波动等相关。

关键词: 泥炭地; 能量通量; 涡度协方差; 大九湖

中图分类号: X124, S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2019)04-0014-08

湿地属于陆地生态系统和水生生态系统的过渡带, 因受多种因素影响而具有独特的水文特征(宋香静等, 2017), 并且因其独特的水热效应和温室气体代谢过程而对全球变化敏感(Zhang et al, 2016)。此外, 湿地在地表和大气层之间的能量交换中起着重要作用, 并且影响着水循环、植物生长等其他生态过程(Dennison et al, 1993)。湿地水文、生态功能和发展在很大程度上取决于当地能量平衡(Runkle et al, 2014)。泥炭地具有重要的水源涵养功能和碳储存潜力, 而这也与泥炭地能量平衡密切相关(Peichl et al, 2013)。表面能平衡的主要成分是净辐射(R_n), 存储在土壤中的热量, 显热通量(H)和潜热通量(LE)(Zhang et al, 2016)。辐射能量分配成潜热和显热的平衡性是区域气候和水文学的主要决定因素(Peichl et al, 2013)。

涡度协方差技术为在所需的时间和空间尺度上

进行通量的直接测量提供了可能(Baldocchi et al, 1988), 并且当下垫面均匀、地形平坦且大气条件(风, 温度, 湿度, CO₂)稳定时是最准确的方法(Kurbatova et al, 2002), 因此近些年被广泛运用于国内外多个地区多种生态系统的通量研究。例如对北美大草原能量通量的季节分布特征及蒸散量进行分析(Burba et al, 2001; Burba et al, 2006; Weveret al, 2002), 比较分析西伯利亚中部沼泽不同下垫面能量通量特征(Kurbatova et al, 2002), 对 Wisconsin 北部灌丛湿地和山地森林的日蒸散量进行测定并分析环境因子对其的影响(Scott et al, 2007); 对内蒙古荒漠草原生态系统的能量平衡及其驱动因子进行分析(阳伏林等, 2010); 对不同竹林的能量闭合状况进行分析(陈云飞等, 2013; 孙成等, 2015)。然而, 泥炭地中能量通量的时间变化及平衡闭合度尚未完全了解, 泥炭地通量的全年测量也比较少(Lafleur, 2008)。

本文利用中国地质大学(武汉)在湖北省神农架林区大九湖国家湿地公园内设定的涡度相关系统观测塔 2015 年 9 月至 2016 年 8 月的能量通量观测数据, 对大九湖泥炭湿地通量进行研究分析, 旨在量化该区域表面能平衡的主要组成部分, 并客观评价该地区观测塔观测数据的质量以及为准确评估泥炭地生态系统与大气间的物质和能量交换提供基础数

收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项(1323521225, 1323521325); 环境保护部生态环境十年变化遥感调查与评估项目(2012046151; 2012046395)。

作者简介: 周颖, 1992 年生, 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 从事湿地生态学研究。E-mail: 962264954@qq.com

通信作者: 葛继稳, 1965 年生, 男, 教授, 从事湿地生态学研究。E-mail: gejiwen2002@aliyun.com

据, 丰富泥炭地通量全年观测的研究。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

大九湖泥炭地位于湖北省神农架林区西北部, 处于中纬度北亚热带季风气候区, 地理位置为东经 $109^{\circ}56' \sim 110^{\circ}11'$ 、北纬 $31^{\circ}24' \sim 31^{\circ}33'$, 面积 $1\,384.6\text{ hm}^2$, 海拔 $1\,700\text{ m}$, 是以泥炭藓为主的贫营养泥炭地, 典型的亚高山泥炭地。大九湖属亚高山寒温带潮湿气候, 日照时间短, 气候温凉, 年平均气温 7.4°C , 年降水量 $1\,528.3\text{ mm}$, 降水丰富且分布均匀, 云雾天气较多, 相对湿度 $> 80\%$, 全年日照 $1\,000\text{ h}$ 左右, 平均每天日照 2.7 h (杜耘等, 2008)。

大九湖亚高山泥炭湿地现存面积虽然不大, 但植物种类较为丰富, 群落类型多样。主要高等植物优势科为莎草科 (Cyperaceae)、禾本科 (Gramineae)、蓼科 (Polygonaceae)、灯心草科 (Juncaceae)、蔷薇科 (Rosaceae) 等。

1.2 仪器与观测

大九湖通量观测塔由太阳能电池板供电, 主要由 Gill 型三维超声风速仪 (WindMaster Pro, Gill, UK)、快速响应的 Li-7500A 型开路红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (Li-cor Inc, USA) 以及 Li-7700 开路式 CH_4 (Li-cor Inc, USA) 分析仪组成。原始采样频率为 10 Hz , 数据传输给 CR1000 数据采集器 (Campbell Inc, USA) 进行存储, 同时根据涡度相关原理在线计算并存储 30 min 的 CO_2 通量 (FC)、潜热通量 (LE) 和显热通量 (H) 等统计量。此外, 还有 Biomet 生物气象观测系统, 如土壤热通量由土壤热通量板 (HFP01, Hukseflux, NLD) 测量, 观测深度 5 cm ; 生物气象观测系统数据采样频率为 0.5 Hz , 通过数据采集器每 30 min 自动记录平均风速、温度、气压和净辐射等常规气象信息。系统工作时由涡度相关原理计算在线通量, 并存储潜热通量与显热通量和时间系列数据, 同时对在线通量自动进行虚温订正与空气密度变化订正。全部观测数据保存到数据采集器的 TF 卡上, 同时配置无线传输模块, 利用远程计算机加载虚拟串口通过 GPRS 连接数据采集器, 实时监测传感器状态, 30 min 数据可以实时传输。

1.3 数据处理

在实际观测中, 由于受到降水及雨雪天气影响, 需要对开路涡度相关系统测量的显热通量 ($H, \text{W}/\text{m}^2$)、潜热通量 ($LE, \text{W}/\text{m}^2$) 相关数据进行剔除。常规气象仪器受天气影响较小, 观测的太阳

净辐射 ($R_n, \text{W}/\text{m}^2$)、土壤热通量 ($G, \text{W}/\text{m}^2$) 可不作处理。剔除降水时期、低于摩擦风速 (u^*) 临界值的数据以及异常值。本研究摩擦风速临界值取 0.15 m/s , 剔除 $u^* < 0.15\text{ m/s}$ 时期数据。显热通量和潜热通量数据都要经过二次坐标旋转校正, 水汽校正 (WPL), 剔除异常通量值, 再进行方差检验, 剔除超过 4 倍标准差的数据 (Falge et al, 2001)。此外, 对于剔除及缺失时期数据要进行插补, 以了解通量数据随时间的动态变化。缺失 1 d 内数据采用线性插补法, 缺失超过 1 d 的根据与该月净辐射回归关系插补。经过数据质量控制和数据插补后的 0.5 h 连续数据, 累加计算月能量通量。

数据处理和统计分析用 origin 8.5 和 excel 2010 完成。

1.4 研究方法

1.4.1 能量平衡 能量平衡指的是涡度相关系统直接测量的潜热通量 (LE) 和显热湍流通量 (H) 之和与净辐射 (R_n)、土壤热通量 (G)、冠层热储量 (植被冠层热储存量 S + 附加能量 Q) 之和的有效能量之间的平衡。土壤热通量为负值时, 表示热量由土壤辐射到植被-大气, 土壤为热源; 土壤热通量为正值时, 表示热量进入土壤, 由植被-大气辐射到土壤, 土壤为热汇。

根据热力学第一定律, 地表能量平衡方程可表达为 (Baldochi et al, 2001):

$$LE + H = R_n + G + S + Q \quad (1)$$

对于裸地或植株矮小的生态系统, 能量平衡方程式可简化为 (Sauer et al, 1998):

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

当湍流能 ($LE + H$) 与有效能 ($R_n + G$) 相同时称为能量闭合, 否则称为能量不闭合。

能量平衡是评价涡度相关数据可信度的重要方法, 国际通量网 (Flux Net) 观测站点都将能量闭合状况分析作为评价通量数据质量的标准 (Wilson et al, 2000)。

本文选取 EBR 法进行能量平衡分析。EBR 是指涡度相关系统直接测定的湍流能量与有效能量的比值, 即:

$$EBR = \frac{\sum (LE + H)}{\sum (R_n - G)} \quad (3)$$

本研究将有典型季节性代表的 10 月 (秋季)、1 月 (冬季)、4 月 (春季)、7 月 (夏季) 0.5 h 间隔时刻下的能量通量数据作月平均处理, 以表征该月的能量通量日变化进程。

1.4.2 能量交换特征 使用波文比(王旭等,2005)表征大气-地表能量交换特征。波文比是显热与潜热的比值。

2 结果与分析

2.1 能量通量日变化特征

大九湖泥炭地全天能量通量变化见图1。10、1、4、7月的能量分量均以净辐射为基础呈单峰型曲线变化。

2.1.1 净辐射 (1)秋季(10月代表)。7:30净辐射变为正值,即能量进入泥炭地成为收入项;12:30净辐射达到最大值(384.81 W/m^2);18:00净辐射变为负值,即能量开始由泥炭地生态系统输出,为支出项。一天中净辐射大于0的通量平均值为 230.48 W/m^2 ,全天净辐射平均值为 89.58 W/m^2 。

(2)冬季(1月代表)。8:30净辐射变为正值,13:30净辐射达到最大值(214.86 W/m^2),17:30净辐射变为负值。一天中净辐射大于0的通量平均值为 128.87 W/m^2 ,全天净辐射平均值为 37.15 W/m^2 。

(3)春季(4月代表)。7:00净辐射变为正值,11:30净辐射达到最大值(448.00 W/m^2),19:00净辐射变为负值。一天中净辐射大于0的通量平均值为 252.51 W/m^2 ,全天净辐射平均值为 113.93 W/m^2 。

(4)夏季(7月代表)。6:30净辐射变为正值,13:00净辐射达到最大值(581.70 W/m^2),19:30净辐射变为负值。一天中净辐射大于0的通量平均值为 325.24 W/m^2 ,全天净辐射平均值为 165.30 W/m^2 。

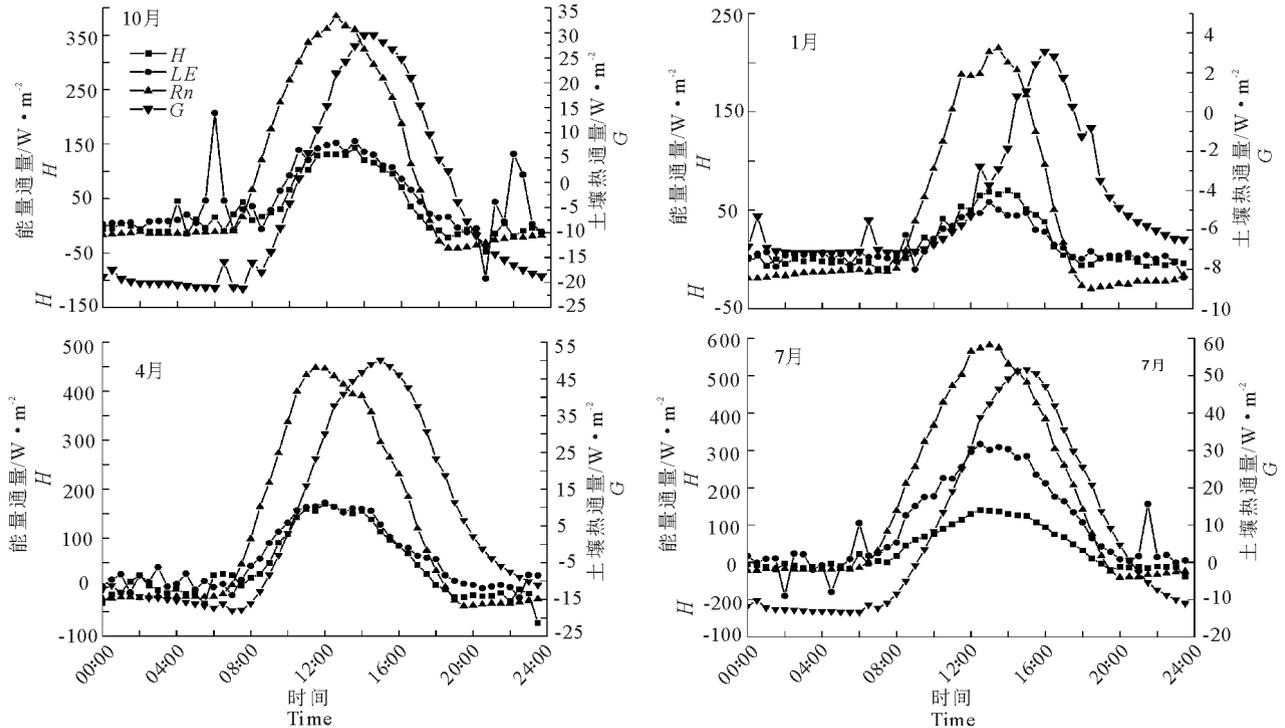


图1 大九湖泥炭地能量分量的日变化

Fig.1 Diurnal variations of energy flux in Dajiuhu peatland

2.1.2 热通量 显热通量和潜热通量变化特征均与净辐射类似,为单峰型。6:00~8:00为上升阶段,12:00~14:00达最大值,之后开始下降,18:30~19:00降到负值。

秋季,显热通量最大值为 143.37 W/m^2 ,日平均 30.41 W/m^2 ;潜热通量最大值为 207.12 W/m^2 。冬季,显热通量最大值为 69.85 W/m^2 ,日平均 13.20 W/m^2 ;潜热通量最大值为 58.10 W/m^2 。春季,显热通量最大值为 170.45 W/m^2 ,日平均

38.93 W/m^2 ;潜热通量最大值为 160.39 W/m^2 。夏季,显热通量最大值为 139.81 W/m^2 ,日平均 34.69 W/m^2 ;潜热通量最大值为 316.73 W/m^2 。

不同季节土壤热通量日变化存在一定差异。土壤热通量变化范围,秋季为 $-21.21 \sim 29.58 \text{ W/m}^2$;冬季为 $-7.19 \sim 3.07 \text{ W/m}^2$,幅度相对较小;春季,由于净辐射的增加,土壤热通量日变化范围为 $-18.10 \sim 50.05 \text{ W/m}^2$,幅度较大;夏季土壤热通量变化范围为 $-13.37 \sim 51.64 \text{ W/m}^2$ 。土壤热通量的日变化

虽也是以净辐射为基础呈单峰型曲线变化, 但土壤热通量日峰值的出现往往较净辐射日峰值推迟 1.5~3 h。

2.2 能量通量的季节变化

以年为时间尺度, 大九湖泥炭地的显热通量、潜热通量及净辐射见图 2, 均近似呈“U”型变化, 土壤热通量变化不明显。

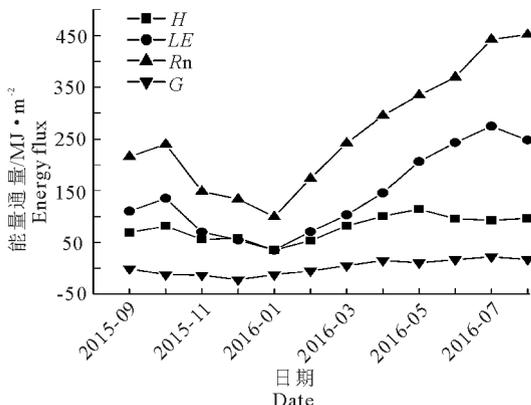


图 2 大九湖泥炭地能量分量的月积累
Fig.2 Monthly accumulation of energy in Dajiuhu peatland

大九湖泥炭地全年净辐射值为 3 146.91 MJ/m²。最大值出现在 8 月, 为 451.86 MJ/m²; 最小值出现在 1 月, 为 99.49 MJ/m²。

全年显热通量总量为 931.79 MJ/m², 占全年净辐射总量的 29.61%。显热通量最大值出现在 5 月, 为 114.22 MJ/m²; 最小值出现在 1 月, 为 35.34 MJ/m²。

全年潜热通量总量为 1 762.40 MJ/m², 占全年净辐射总量的 56.00%。潜热通量为蒸散耗热, 1-7 月随水热同期逐渐升高, 7 月达到峰值, 为 275.02 MJ/m²; 12-1 月潜热通量与显热通量总量近乎相等, 其他月份潜热通量总量均大于显热通量总量。大九湖泥炭地能量通量分配特征为潜热通量大于显热通量。

全年土壤热通量的变化幅度并不大, 且数值上较其他能量分量相差 1~2 个数量级, 全年总量为 22.26 MJ/m², 仅占净辐射总量的 0.71%。以月尺度看, 土壤热通量 3-8 月为正值; 最大值在 7 月, 为 22.35 MJ/m²; 最小值在 12 月, 为 -22.77 MJ/m²。

2.3 能量通量分配特征及波文比

将泥炭地 2015-2016 年能量通量按雨季(6-9 月)与非雨季(10-12 月, 1-3 月)划分, 分别分析净辐射与潜热通量、显热通量的关系。

泥炭地雨季显热通量总量为 351.03 MJ/m², 净辐射总量为 1 479.81 MJ/m², 显热通量占净辐射的 23.72%; 潜热通量总量为 941.73 MJ/m², 占净辐射的 63.64%。非雨季显热通量总量为 580.76 MJ/m², 净辐射总量为 1 667.09 MJ/m², 显热通量占净辐射的 34.84%; 潜热通量总量为 820.67 MJ/m², 占净辐射的 49.23%。全年显热通量占净辐射的 29.61%, 潜热通量占净辐射的 56.00%, 潜热通量约为显热通量的 2 倍。

神农架大九湖泥炭地全年波文比波动较大(图 3)。12 月最大(1.06), 7 月最小(0.34); 仅 2015 年 12 月份显热大于潜热, 其他月份均是潜热大于显热。月平均波文比为 0.65, 年波文比为 0.53。

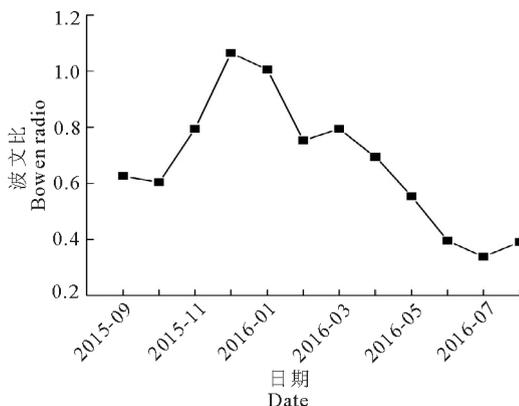


图 3 大九湖泥炭地波文比月变化

Fig.3 Monthly variation of the Bowen ratio in Dajiuhu peatland

2.4 能量平衡分析

将全年涡度相关法测得的湍流能量(H+LE)与有效能量(Rn-G)利用 EBR 法进行闭合度分析, 见图 4。EBR 有明显的月变化, 最大值出现在 9 月(1.11), 最小值出现在 1 月(0.63); 除 9 月出现过闭合现象外, 其他月份均表现为能量不闭合现象, 月平

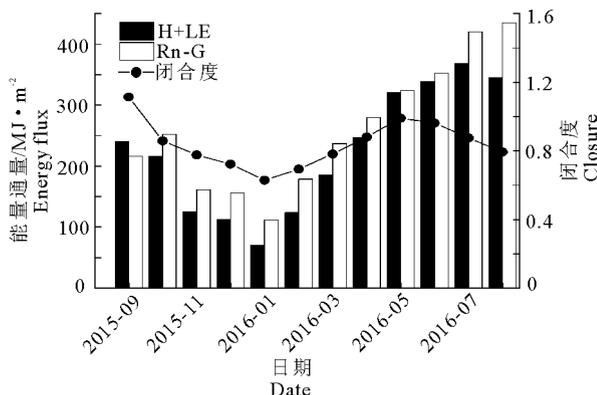


图 4 大九湖泥炭地能量的月积累与能量闭合度变化
Fig.4 Monthly variation of energy accumulation and closure in Dajiuhu peatland

均闭合度为 0.84, 年 EBR 为 0.86, 即能量不闭合度为 14%。其中, 雨季的闭合度达到 0.91, 非雨季为 0.82, 雨季的能量平衡状况较好。

对神农架大九湖泥炭地的能量进行了全年和逐月能量平衡线性回归分析。全年湍流通量 ($H+LE$) 与有效能量 ($Rn-G$) 线性回归分析的结果见图 5, 拟合全年 ($H+LE$) 与 ($Rn-G$) 所得到的曲线斜率为 0.68, 截距为 19.698, R^2 为 0.72。

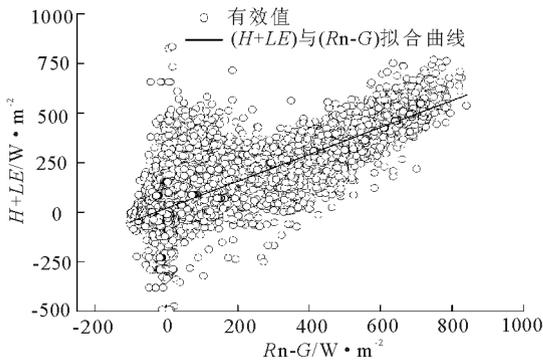


图 5 大九湖全年能量闭合线性回归分析

Fig.5 Linear regression analysis of annual energy closure at Dajihu peatland

以 0.5 h 为时间尺度, 大九湖泥炭地逐月线性回归参数及 EBR 见表 1。斜率变化为 0.18~0.75, 截距变化为 8.93~36.77, 相关系数变化为 0.48~0.81。

表 1 大九湖泥炭地不同时间尺度下线性回归参数及 EBR

Tab.1 Linear regression parameters and EBR at different time in Dajihu peatland

时间	斜率	截距	相关系数	EBR
2015.09	0.70	34.18	0.63	1.11
2015.10	0.62	22.07	0.62	0.86
2015.11	0.60	11.24	0.75	0.78
2015.12	0.50	13.55	0.73	0.72
2016.01	0.18	36.77	0.48	0.63
2016.02	0.54	11.14	0.76	0.69
2016.03	1.03	17.12	0.67	0.78
2016.04	0.71	18.90	0.79	0.88
2016.05	0.72	32.68	0.70	0.99
2016.06	0.75	29.01	0.71	0.96
2016.07	0.74	20.90	0.78	0.88
2016.08	0.74	8.93	0.81	0.79

3 讨论

3.1 神农架大九湖泥炭湿地能量交换动态

大九湖泥炭地的全年净辐射总量 (3 146.91 MJ/m²) 高于内蒙古温带荒漠草原生态系统 (1 672.80 MJ/m²) (阳伏林等, 2010)、黄土高原半干旱草原 (2 269.23 MJ/m²) (岳平等, 2011)、亚热带毛竹林生态系统 (2 628.00 MJ/m²) (孙成等,

2015)。太阳总辐射是净辐射的主要能源, 对净辐射的大小起决定性作用 (刘允芬等, 2000)。大九湖泥炭地属于亚高山湿地, 海拔高度在 1 700 m 以上, 太阳辐射较其他生态系统所在地区强。此外, 净辐射对于下垫面而言既是辐射的收入项, 又是热量的支出项 (Raschke et al, 1992)。大九湖泥炭湿地常年有积水, 且泥炭藓生长密集, 地表覆盖率高, 使得土壤基本处于饱和状态, 下垫面反射率较其他生态系统低。因此, 大九湖泥炭地净辐射总量比其他生态系统高可能是受辐射强度及下垫面等因素的影响。生态系统的群落类型和下垫面不同, 蒸散发和热传导能力便存在差异, 因此不同生态系统获得净辐射能量后, 能量在系统内的分配变化特点也不尽相同。

能量分配, 特别是潜热和显热之间的能量分配, 决定了大气的水蒸汽和热含量。大九湖泥炭地的全年能量分配以潜热通量为主, 占年总净辐射的 56.00%, 主要是以潜热通量形式加热大气, 通过蒸发散耗能; 显热通量占年总净辐射的 29.61%, 土壤热通量仅占净辐射的 0.71%。土壤热通量占净辐射的比例虽然很小, 然而土壤热通量白天吸收能量、夜间释放能量, 夏季储存能量、冬季释放能量的特点, 对昼夜及不同季节系统能量收支起类似“能量缓存”作用, 因此研究神农架大九湖泥炭湿地能量平衡时, 土壤热通量不能被忽略。各能量分量日变化基本呈倒“U”型单峰曲线变化, 但潜热通量曲线不如其他曲线平滑, 推测可能与湍流传输的间歇性相关 (Zhang et al, 2002)。研究中发现, 土壤热通量日峰值的出现往往较净辐射日峰值推迟 1.5~3 h, 这是因为土壤热通量对净辐射的反馈存在延滞现象 (尹光彩等, 2006); 各个季节日峰值推迟时间不相同, 是因为不同季节土壤理化性质不同, 导致土壤热导率不同, 影响土壤吸热散热 (王旭等, 2005)。

各能量分量季节变化明显, 最大值出现在春季末或夏季, 最小值均出现在冬季, 这与日照时间及辐射强度相关。土壤热通量的季节变化特征较明显, 3~8 月为正值, 其他月为负值, 原因可能是 3 月随着积雪的融化, 5 cm 深的土壤开始解冻, 土壤向下的热传输逐渐增加, 逐步补充冬季土壤损失的能量后土壤能量开始累积, 直至 7 月达到最大值。

波文比月变化波动较大, 在 0.34~1.06, 12 月最大、7 月最小。大九湖泥炭地波文比从 2 月到 9 月基本呈减小趋势; 6、7、8 月雨季时期, 泥炭藓正处于生长最旺盛的阶段, 储水能力较强, 空气湿度大, 能量主要用于生态系统的蒸散耗热, 湍流通量以潜

热通量为主, 潜热通量总量约为显热通量总量的 2.7 倍, 因此波文比较小。吴海龙等(2013)研究表明, 显热通量值与土壤含水量呈负相关关系。神农架大九湖 9 月后波文比逐步上升, 可能是因为温度逐渐降低, 能量用来加热空气, 潜热通量减小, 而非雨季由于下垫面相对比较干燥, 因此分析可能与 9 月后进入冰雪天气、土壤含水量降低有关。这些表明神农架大九湖泥炭地生态系统辐射能的再分配可能受气温、土壤及植被下垫面共同影响。

3.2 神农架大九湖泥炭湿地能量不闭合原因

国际通量站点的能量闭合度范围普遍为: 斜率 0.55~0.99, 相关系数 0.64~0.96 (Wilson et al, 2002); 中国通量网 8 个站点中, 斜率的变化范围为 0.49~0.81, 截距变化范围为 10~79.9, 相关系数变化范围为 0.52~0.94 (李正泉等, 2004)。本研究所得结果与国内外相关研究基本一致。

能量闭合理论上成立的, 然而各通量站点均存在不同程度的能量不闭合现象, 一般存在 10%~30% 的不闭合 (Wilson et al, 2002)。大九湖泥炭地的月 EBR 值变化在 0.63~1.11, 1 月最小、9 月最大; 月平均闭合度为 0.84, 年平均闭合度为 0.86, 表明泥炭地能量仍有 14% 不闭合现象。其中 1 月份相关系数小于 0.5, 分析可能与 1 月下垫面为积雪且冰雪层较厚相关。大九湖泥炭地的闭合度相对于同类观测处于中上水平, 高于黄土高原半干旱区 (0.85) (肖霞等, 2010)、亚热带毛竹林 (0.85) (孙成等, 2015)、黄河小浪底人工混交林 (0.79) (原文文等, 2015), 低于安徽省寿县农田 (0.89) (田红等, 2011) 和西藏高寒草原 (0.91) (李泉等, 2008)。说明该站点涡度数据可靠, 通量特征及规律具有较好的代表性, 有利于通量研究的进一步开展。9 月份出现过闭合现象可能是当月仪器曾处于异常状态导致数据缺失较多, 加之数据插补及计算方法误差等综合原因造成。

本站点能量不闭合的原因主要有以下几个方面:

(1) 下垫面的状况。当下垫面为雪地时, 冻结、融解、升华等过程伴随着能量的转化 (Kurbatova et al, 2002), 并且神农架大九湖冰雪期较长, 而本研究并未对这些过程中的能量加以考量, 这是本站点能量不闭合的重要原因。

(2) 湍流的不稳定。夜间湍流弱, 涡度相关系统对湍流能量的测定结果较实际偏低, 导致整体湍流能量被低估 (Ding et al, 2010); 并且季节变化及平

流的影响均会产生波动 (Kyaw et al, 2000)。

(3) 其他能量的忽略。平衡方程(1)中储热通量 Q 在后面计算能量平衡时是忽略不计的, 虽然在能量通量的研究中 Q 值普遍被忽略, 但是很少有研究对 Q 值进行精确的计算。本研究中埋在土壤里的热通量传感器的热储存以及地表水层热储存被忽略也是影响能量不闭合的原因。

总体来看, 神农架大九湖泥炭地全年的能量不平衡程度为 14%, 处于国际通量研究的可接受不平衡程度范围 10%~30% (Wilson et al, 2002), 且远低于中国通量网平均 27% 的不闭合度 (李正泉等, 2004), 说明采用涡度相关法测得的神农架大九湖泥炭地的通量观测数据是比较可靠的。

涡度相关法是目前国际各个站点测定能量通量的最常用方法, 它可以揭示不同时间尺度上土壤—植被—大气的能量分配特征, 能量不平衡现象在相关研究中普遍存在, 然而仍没有研究能够对此现象给予充分的解释。虽然很多研究中将能量闭合水平作为涡度相关法数据质量控制的重要依据之一, 但是闭合水平依赖于不同时间尺度, 而且能量闭合水平及其对应的测量误差范围的定量关系并没有建立。本文只对神农架大九湖泥炭地的一年能量通量特征进行了分析, 讨论了该生态系统的能量平衡状况, 对能量平衡特征驱动因子的确定及分析仍需进一步研究。

参考文献

- 陈云飞, 江洪, 周国模, 等, 2013. 高效经营雷竹林生态系统能量通量过程及闭合度[J]. 应用生态学报, 24(4): 1063-1069.
- 杜耘, 蔡述明, 王学雷, 等, 2008. 神农架大九湖亚高山湿地环境背景与生态恢复[J]. 长江流域资源与环境, 17(6): 915-919.
- 李泉, 张宪洲, 石培礼, 等, 2008. 西藏高原高寒草甸能量平衡闭合研究[J]. 自然资源学报, 23(3): 391-399.
- 刘允芬, 李家永, 2000. 亚热带红壤丘陵区水稻田净全辐射初探[J]. 生态农业研究, 8(1): 5-9.
- 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等, 2004. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价[J]. 中国科学: 地球科学, 34(2): 46-56.
- 宋香静, 李胜男, 郭嘉, 等, 2017. 环境变化对湿地植物根系的影响研究[J]. 水生态学杂志, 38(2): 1-9.
- 孙成, 江洪, 陈健, 等, 2015. 亚热带毛竹林生态系统能量通量及平衡分析[J]. 生态学报, 35(12): 4128-4136.
- 田红, 伍琼, 童应祥, 2011. 安徽省寿县农田能量平衡评价[J]. 应用气象学报, 22(3): 356-361.

- 王旭,尹光彩,周国逸,等,2005. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究[J]. 热带亚热带植物学报,13(3): 205-210.
- 王旭,周国逸,张德强,等,2005. 南亚热带针阔混交林土壤热通量研究[J]. 生态环境学报,14(2): 260-265.
- 吴海龙,余新晓,张艳,等,2013. 异质下垫面显热通量动态变化及对环境因子的响应[J]. 水土保持研究,20(4): 164-169.
- 肖霞,左洪超,刘辉志,等,2010. 春末黄土高原半干旱区地表能量闭合的观测研究[J]. 冰川冻土,32(1): 70-77.
- 阳伏林,周广胜,2010. 内蒙古温带荒漠草原能量平衡特征及其驱动因子[J]. 生态学报,30(21): 5769-5780.
- 尹光彩,王旭,周国逸,等,2006. 鼎湖山针阔混交林土壤热状况研究[J]. 华南农业大学学报,27(3): 16-20.
- 原文文,同小娟,张劲松,等,2015. 黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征[J]. 生态学报,35(13): 4492-4499.
- 岳平,张强,杨金虎,等,2011. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率[J]. 生态学报,31(22): 6866-6876.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al, 2001. 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, 82(11): 2415-2434.
- Baldocchi D D, Hincks B B, Meyers T P, 1988. Measuring Biosphere-Atmosphere Exchanges of Biologically Related Gases with Micrometeorological Methods[J]. Ecology, 69(5): 1331-1340.
- Burba G G, Verma S B, 2001. Prairie growth, PAR albedo and seasonal distribution of energy fluxes[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 107(3): 227-240.
- Burba G G, Verma S B, 2006. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 135(1): 190-201.
- Dennison M S, Berry J F, 1993. Wetlands: guide to science, law, and technology[M]. USA: Noyes Publications: 439.
- Ding R S, Kang S Z, Li F S, et al, 2010. Evaluating eddy covariance method by large-scale weighing lysimeter in a maize field of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 98(1): 87-95.
- Raschke E, Cattle H, Lemke P, et al, 1991. Report of the Working Group on Polar Radiation Fluxes and Sea Ice Modelling[R]. Bremerhaven, Germany: World Climate Research Program, WMO/TD: 442.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al, 2001. Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 107(1): 71-77.
- Kurbatova J, Arneth A, Vygodskaya N N, et al, 2002. Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog I. Interseasonal and interannual variability of energy and latent heat fluxes during the snowfree period[J]. Tellus Series B-chemical & Physical Meteorology, 54(5): 497-513.
- Kyaw T P U, Baldocchi D D, Meyers T P, et al, 2000. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes[J]. Boundary-Layer Meteorology, 97(3): 487-511.
- Lafleur P M, 2008. Connecting Atmosphere and Wetland: Energy and Water Vapour Exchange [J]. Geography Compass, 2(4): 1027-1057.
- Peichl M, Sagerfors J, Lindroth A, et al, 2013. Energy exchange and water budget partitioning in a boreal minerogenic mire[J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 118(1): 1-13.
- Runkle B R K, Wille C, Gažovic M, et al, 2014. The surface energy balance and its drivers in a boreal peatland fen of northwestern Russia[J]. Journal of Hydrology, 511(4): 359-373.
- Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, et al, 1998. Surface energy balance of a corn residue-covered field[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 89(3/4): 155-168.
- Scott M D, Ewers B E, Cook B D, et al, 2007. Environmental drivers of evapotranspiration in a shrub wetland and an upland forest in Northern Wisconsin [J]. Water Resources Research, 43(3): W03442.
- Wever L A, Flanagan L B, Carlson P J, 2002. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 112(1): 31-49.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al, 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 113(1-4): 223-243.
- Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D, 2000. Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 102(2/3): 83-103.
- Zhang J H, Ding Z H, Han S J, et al, 2002. Turbulence regime near the forest floor of a mixed broad leaved/Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Journal of Forestry Research, 13(2): 119-122.
- Zhang Q, Sun R, Jiang G, et al, 2016. Carbon and energy flux from a *Phragmites australis* wetland in Zhangye oasis-desert area, China[M]. 45-57.

Energy Flux and Balance Analysis of Dajiuhu Peatland in Shennongjia

ZHOU Ying^{1,2,3}, GE Ji-wen^{1,2,3}, PENG Feng-jiao⁴, LI Yan-yuan⁴,
LI Jin-qun^{1,2,3}, LI Yong-fu^{1,2,3}, WENG Wen-chang^{1,2,3}

- (1. Hubei Key Laboratory of Wetland Evolution and Ecological Restoration, China University of Geoscience, Wuhan 430074, P.R.China;
2. Laboratory of Basin Hydrological and Wetland Eco-restoration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China;
3. Institute of Ecology and Environmental Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, P.R.China;
4. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, P.R.China)

Abstract: Wetlands play an important role in the energy exchange between the earth's surface and atmosphere, and affect other ecological processes such as water cycle and plant growth. Wetland hydrology and ecological function depend on the local energy balance and measuring the energy balance is an effective means of assessing the water conservation and carbon storage potential of wetlands. In this study, the distribution of energy components and seasonal variation of the energy fluxes in Dajiuhu peatland were analyzed based on one-year of turbulent energy flux data, automatically measured by an eddy covariance system from September 2015 to August 2016. The aim of the study was to evaluate the quality of the monitoring data by the eddy covariance system and provide basic data on the energy exchange between the peatland ecosystem and the atmosphere. Results show: (1) The annual net radiation of peatland, yearly sensible heat flux, latent heat flux and soil heat flux were, respectively, 3 146.91 MJ/m², 931.79 MJ/m² and 1 762.40 MJ/m², 22.26 MJ/m². The latent heat flux accounted for 56% of the net radiation, indicating that latent heat flux is the main source of energy loss in this ecosystem, and the peatland soil acts as a heat-sink. (2) The energy components clearly varied with season, and the diurnal change of the energy components in October, January, April, and July displayed a similar unimodal curve, based on net radiation. (3) Monthly variation of the Bowen ratio was irregular. The monthly Bowen ratio was in the range of 0.34 – 1.06, averaging 0.65 and the annual Bowen ratio was 0.53. The latent heat flux dominated the yearly energy budget and was significantly higher than the sensible heat flux. (4) The yearly energy closure of the peatland in Shennongjia was 0.86. The energy imbalance may result from the condition of the underlying surface, seasonal changes and the effects of advection. The results of this study are consistent with research results at home and abroad, indicating that the energy fluxes in the Dajiuhu peatland measured by the eddy correlation method are reliable. We recommend continued study of the driving factors of energy balance in peatlands.

Key words: peatland; energy flux; eddy covariance; Dajiuhu peatland