

青海湖2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统水热通量比较

吴方涛^{1,2}, 曹生奎^{1,2}, 曹广超^{1,2}, 汉光昭¹, 林阳阳¹, 成淑艳¹

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810008; 2. 青海师范大学, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008)

摘要: 基于涡度相关技术, 研究了2015年青海湖2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统水热通量的特征。结果表明: (1) 2015年青海湖高寒藏嵩草和小嵩草湿草甸湿地生态系统日平均水汽通量分别为1.74, 0.99 mm, 年水汽通量分别为633.3, 362.1 mm。(2) 青海湖2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统感热、潜热和净辐射日变化均呈单峰曲线, 感热和潜热月平均日变化最大值出现的时间均晚于净辐射。藏嵩草湿草甸湿地生态系统感热月均日变化最大值最大为179.06 W/m², 最小为46.02 W/m²; 潜热最大为312.55 W/m², 最小为30.58 W/m²; 小嵩草湿草甸湿地生态系统感热月均日变化最大值最大为161.86 W/m², 最小为31.60 W/m²; 潜热最大为215.44 W/m²; 最小为14.08 W/m²。(3) 通过波文比分析发现, 2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统生长季能量分配以潜热为主, 非生长季小嵩草湿草甸湿地生态系统能量分配以感热为主, 藏嵩草湿草甸湿地生态系统则较为复杂。藏嵩草湿草甸湿地生态系统全年能量平衡率为0.82, 小嵩草湿草甸湿地生态系统为0.89, 增加土壤热通量项能改善能量平衡状况。

关键词: 高寒嵩草湿草甸湿地; 感热通量; 潜热通量; 水汽通量; 能量平衡

中图分类号: P404

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)05-0176-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.05.028

Comparative Study on Hydrothermal Fluxes of Two Alpine *Kobresia* Wet Meadow Wetland Ecosystems in Qinghai Lake

WU Fangtao^{1,2}, CAO Shengkui^{1,2}, CAO Guangchao^{1,2},

HAN Guangzhao¹, LIN Yangyang¹, CHENG Shuyan¹

(1. College of Life and Geography Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810008; 2. Qinghai Province

Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008)

Abstract: Based on the eddy covariance technique, the characteristics of water and heat fluxes of two alpine wet meadow wetland ecosystems in Qinghai Lake were studied in 2015. Results showed as follows: (1) The average daily water vapor fluxes of alpine *Kobresia tibetica* and *Kobresia humilis* wet meadow wetland ecosystems were 1.74 mm and 0.99 mm, respectively, and the annual water vapor fluxes were 633.3 mm and 362.1 mm, respectively, in Qinghai lake 2015. (2) The diurnal variation of sensible heat, latent heat and net radiation all showed a single peak curve in two kinds of alpine *Kobresia* wet meadow wetland ecosystems, the diurnal variation maximum value of the sensible heat and latent heat occurred later than the net radiation. The maximum value of the diurnal variation of the sensible heat was 179.06 W/m² and the minimum was 46.02 W/m²; the maximum value of latent heat was 312.55 W/m² and the minimum was 30.58 W/m², in *K. tibetica* wet meadow wetland ecosystem. The maximum value of diurnal variation of the sensible heat was 161.86 W/m² and the minimum was 31.60 W/m²; the maximum value of latent heat was 215.44 W/m² and the minimum was 14.08 W/m², in *K. humilis* wet meadow wetland ecosystem. (3) Through the analyse of bowen ratio; the energy distribution of two alpine *Kobresia* wet meadow was mainly latent heat in growing season; in the non-growing season the energy distribution of *K. humilis* wet meadow wetland ecosystem was dominated by sensible heat, *K. tibetica* wet meadow wetland ecosystem was more complex. The annual energy balance rate of *K. tibetica* wet meadow wetland ecosystem was 0.82, and the *K. humilis* wet meadow wetland ecosystem was 0.89, and the increase of soil heat flux item can improve the energy balance.

收稿日期: 2017-04-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(31260130); 中国科学院“西部之光”计划项目(科发人教字[2012]179号); 中国博士后基金项目(2013M542400); 教育部科学技术重点研究项目和青海省重点实验室平台建设项目(2014-Z-Y24, 2015-Z-Y01)

第一作者: 吴方涛(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事全球变化生态学及陆地生态系统碳循环研究。E-mail: wuf1991@163.com

通信作者: 曹生奎(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事全球变化生态学及陆地生态系统碳循环研究。E-mail: caoshengkui@163.com

Keywords: alpine *Kobresia* wet meadow wetland; sensible heat flux; latent heat flux; water vapor flux; energy balance

水循环是生态系统中的关键组成部分之一,连接着许多生物地球化学和能量循环过程^[1]。能量交换可影响如温度、水上运输以及植物的生长和生产力等诸多因素,是生态系统中非常重要的过程^[2]。水汽与能量在陆地表面和大气之间交换的过程中,通过相互作用而影响区域小气候,进而影响着植物光合、蒸散以及土壤热过程等^[3-4]。

湿地生态系统处于陆地生态系统和水生生态系统之间,兼有陆地生态系统和水生生态系统的属性,具有涵养水源、调蓄水资源、水净化、荒漠化防治和气候调节等生态功能^[5-6]。青藏高原平均海拔4 000 m左右,是世界上最高的高原,独特的热力学过程增强了亚洲季风,进而影响全球水和能量循环^[7]。反过来,由于其独特的水热效应,使其对全球变化十分敏感。青藏高原湿地面积 $13.19 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[8],占全国湿地面积的20%^[9],为此,众多学者对青藏高原湿地生态系统中能量平衡、水汽来源和水热变化特征等方面开展了研究,并取得了丰硕的成果^[10-13]。

位于青藏高原东北部的青海湖,是中国最大的内陆湖、咸水湖,也是世界著名的高寒湿地,它处于青南高原高寒区,西北干旱区和东部季风区的交汇处,是维系青藏高原东北部生态安全的重要水体和控制西部荒漠化向东蔓延的天然屏障^[14]。然而,在自然因素和不合理人为活动的影响下,青海湖流域及其周边地区正面临土地沙漠化、湿地萎缩、草场退化、水土流失和生物多样性减少等生态环境问题^[15-16]。这种情景下势必会导致流域系统中水热等生态过程发生变化,而目前对这一流域水热研究的综合报道较少,无疑会阻碍我们认识青海湖流域水热特征和过程及其对环境变化的响应。为此本文基于涡度相关系统,对青海湖2种高寒湿草甸湿地生态系统2015年水热通量进行了研究,以期揭示青海湖高寒湿地生态系统水热通量特征及其影响因素,为制定青海湖高寒湿地生态系统生态可持续发展战略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海湖流域位于青海省东北部,北依大通山,南靠青海南山,东邻日月山,西为天峻山。试验地位于青海湖东岸的藏嵩草湿草甸湿地生态系统和青海湖北部瓦颜山地区的小嵩草湿草甸湿地生态系统中。藏嵩草湿草甸湿地生态系统位于青海湖湖东种羊场以北约10 km,西距青海湖约3 km,东西长南北窄,实验站(地理坐标 $36^{\circ}42'12.42'' \text{ N}$, $100^{\circ}46'59.34'' \text{ E}$,海拔3 228 m)安装有

开路式涡度相关系统(LI-7500A,LI-Cor,USA)。观测区地势平坦,植被以多年生草本植物群落为主,主要优势植物种为藏嵩草(*Kobresia tibetica*)和华扁穗(*Blysmus sinocompressus*),土壤以高寒沼泽土为主。小嵩草湿草甸湿地生态系统位于青海湖北部沙柳河河源区,属河源区湿地,实验站(地理坐标 $37^{\circ}44'25.76'' \text{ N}$, $100^{\circ}5'25.5'' \text{ E}$,海拔3 780 m)安装了一套闭路式涡度相关系统(LI-7200,LI-Cor,USA)。观测区植被较为单一,建群优势植物种主要为小嵩草(*Kobresia humilis*),土壤为沼泽土和草甸土,土壤厚度约为1.2 m,其下为洪积堆积物。两试验区表层均分布有季节性冻土,深层为永久性冻土,都有配套的自动气象站进行常规气象因子的观测,所有观测项目的传感器24 h全天候观测。

1.2 数据处理与分析

对所观测的涡度相关原始数据使用EddyPro6.0(LI-Cor,USA)软件进行水汽、感热和潜热通量的计算,在计算过程中同时进行了坐标旋转、WPL校正^[17]处理。由于开路式涡度相关系统LI-7500A分析仪存在表面加热效应,特别是当气温小于 -10° C 时,对通量影响更为显著^[18-19]。为此,对藏嵩草湿草甸湿地生态系统气温低于 -10° C 的11月至次年3月的数据进行了仪器表面自加热效应的校正。

由于受研究区环境恶劣,天气突变等因素影响,观测数据不可避免出现缺失情况,同时会出现“野点”和异常值,在具体数据质量控制过程中需将其剔除,主要包括:(1)剔除降水同期观测数据,降水扰动了生态系统正常的大气流动,并有可能导致仪器失灵,因此需要剔除降水同期的观测数据,以保证数据的质量^[20]。(2)夜间数据质量的控制,夜间(太阳总辐射 $<10 \text{ W/m}^2$)大气处于稳定结层状态下,导致仪器不能捕捉底部的微弱湍流信号,造成通量数据的低估^[21];考虑到2个区域自身的区域特征,藏嵩草湿草甸湿地生态系统剔除夜间摩擦风速低于 0.15 m/s 对应的通量数据^[22],小嵩草湿草甸湿地生态系统剔除夜间摩擦风速低于 0.1 m/s 对应的通量数据^[23],以保证数据的质量。

通量数据采用多种方法相结合插补缺失或丢弃的数据以获得完整通量时间序列,主要包括:(1)缺失间隔 $<2 \text{ h}$ 或更短时使用平均值法和线性内插法进行插补;(2)缺失时间间隔 $\geq 2 \text{ h}$,常规气象数据完好时,使用经验公式法插补^[24]。

能量平衡闭合是指利用涡度相关仪器直接观测的潜热通量和显热通量之和与净辐射、土壤热通量、冠层热储量等之间的平衡^[25]。本研究采用能量平衡

率 EBR 来观测研究区的能量平衡状况。藏嵩草湿草甸湿地仪器观测的热量分量项目有感热(H)、潜热(LE)和净辐射(R_n);小嵩草湿草甸湿地仪器观测的主要项目也有感热、潜热、净辐射,另外小嵩草湿草甸湿地增加了土壤热通量(G),进行分析土壤热通量对本系统能量闭合的影响。

2 结果与分析

2.1 青海湖湿地生态系统水汽通量日变化特征

由图 1、图 2 可知,2 种嵩草湿草甸湿地生态系统生长季(5—10 月)水汽通量都大于非生长季(11 月—次年 4 月)。藏嵩草湿草甸湿地生态系统,2015 年平均日水汽通量为 1.74 mm,年水汽通量为 633.3 mm,最大日水汽通量出现在 7 月 13 日,为 4.73 mm;最小出现在 12 月 18 日,为 0.13 mm(图 1)。小嵩草湿草甸湿地生态系统,2015 年平均日水汽通量为 0.99 mm,年水汽通量为 362.1 mm,最大日水汽通量出现在 7 月 24 日,为 3.93 mm;最小出现在 1 月 17 日,为 0.02 mm(图 2)。

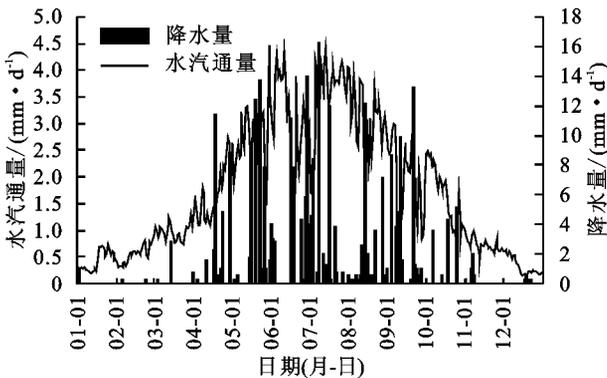


图 1 藏嵩草湿草甸湿地生态系统水汽通量逐日变化

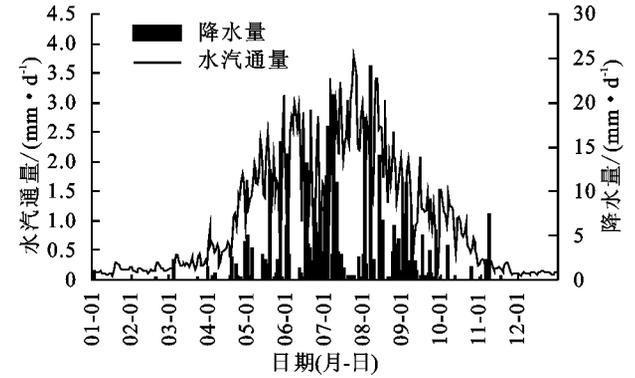
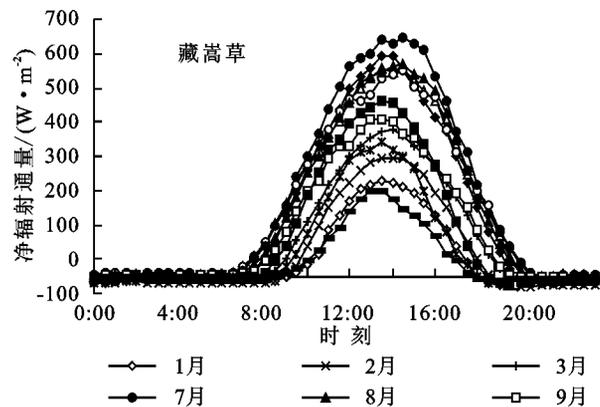


图 2 小嵩草湿草甸湿地生态系统水汽通量逐日变化

2.2 青海湖湿地生态系统能量通量月均日变化

2.2.1 净辐射月均日变化 青海湖藏嵩草和小嵩草湿草甸湿地类型净辐射月均日变化均呈“单峰”形曲线(图 3)。在夜间 2 种嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射基本保持为负值,而随着日出逐渐从负值转为正值,在 12:00—14:30 达到最大值,而后随着太阳高度的减小而逐渐变小,日落前后从正值转为负值。藏嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射最大值由高到低依次为 7 月>4 月>8 月>5 月>6 月>10 月>9 月>3 月>11 月>2 月>1 月>12 月,最大出现在 7 月的 14:30,为 648.51 W/m^2 ;最小出现在 2 月的 20:00,为 $-79.36 W/m^2$ 。小嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射最大值由高到低依次为 7 月>5 月>8 月>4 月>9 月>6 月>10 月>3 月>2 月>11 月>1 月>12 月,最大出现在 7 月的 13:00,为 510.25 W/m^2 ;最小出现在 12 月的 18:30,为 $-87.04 W/m^2$ 。对比发现,相同月份,藏嵩草湿草甸湿地生态系统最大值均大于小嵩草湿草甸湿地生态系统。

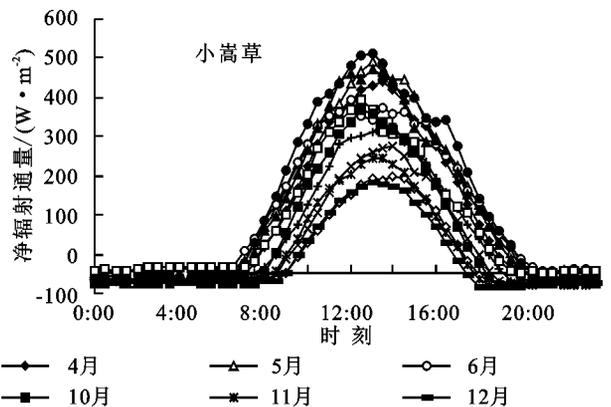


图 3 净辐射通量月平均日变化

2.2.2 感热月均日变化 由图 4 可知,青海湖 2 种嵩草湿草甸湿地类型感热通量月均日变化具有相同的单峰变化趋势。藏嵩草湿草甸湿地生态系统感热通量伴随着日出,大约在 7:30—10:00 由负值转化为正值,其生长季转化时间要早于非生长季;而由正值转化为负值的时间大约在 17:30—19:00,转化时间非生长季早于生长季。感热通量最大值由高到低依次为 4 月>3 月>

2 月>5 月>10 月>1 月>7 月>8 月>9 月>6 月>11 月>12 月,最大出现在 4 月的 14:00,为 179.06 W/m^2 ;最小出现在 12 月的 14:00,为 46.02 W/m^2 。小嵩草湿草甸湿地生态系统感热正负转化的时间范围较宽,最大值由高到低依次为 3 月>4 月>2 月>5 月>10 月>1 月>9 月>8 月>6 月>7 月>11 月>12 月,最大出现在 3 月的 13:30,为 161.86 W/m^2 ;最小出

现在 12 月的 13:00,为 31.60 W/m²。2 种嵩草湿草甸湿地生态系统白天感热通量为正值,生态系统通过

湍流向大气放出热量,晚上基本为负值,大气向生态系统传输热量,而且晚上变化相对于白天较平缓。

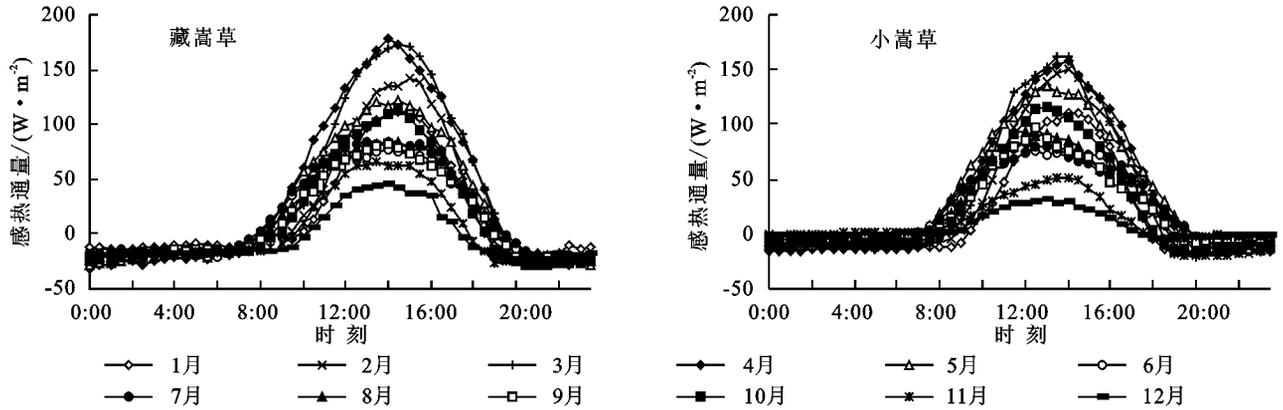


图 4 感热通量月平均日变化

2.2.3 潜热月均日变化 由图 5 可知,青海湖 2 种嵩草湿草甸湿地类型潜热通量月平均日变化与感热具有相同的变化趋势。与感热不同的是,藏嵩草湿草甸湿地生态系统日变化不存负值,小嵩草湿草甸湿地生态系统只有非生长季个别月份夜里存在负值。藏嵩草湿草甸湿地生态系统各月潜热最大值由高到低依次为 7 月>8 月>6 月>5 月>10 月>9 月>4 月>3 月>11 月>2 月>1 月>12 月,最大出现在 7 月的

15:30,为 312.55 W/m²,最小出现在 12 月的 14:30,为 30.58 W/m²。小嵩草湿草甸湿地生态系统各月潜热最大值由高到低依次为 7 月>8 月>5 月>6 月>9 月>10 月>4 月>3 月>11 月>1 月>2 月>12 月,最大出现在 7 月的 13:30,其值为 215.44 W/m²;最小出现在 12 月的 13:00,为 14.08 W/m²。可以看出,2 种嵩草湿草甸湿地生态系统各月潜热最大值出现的顺序较为一致,但藏嵩草各月最大值都大于小嵩草。

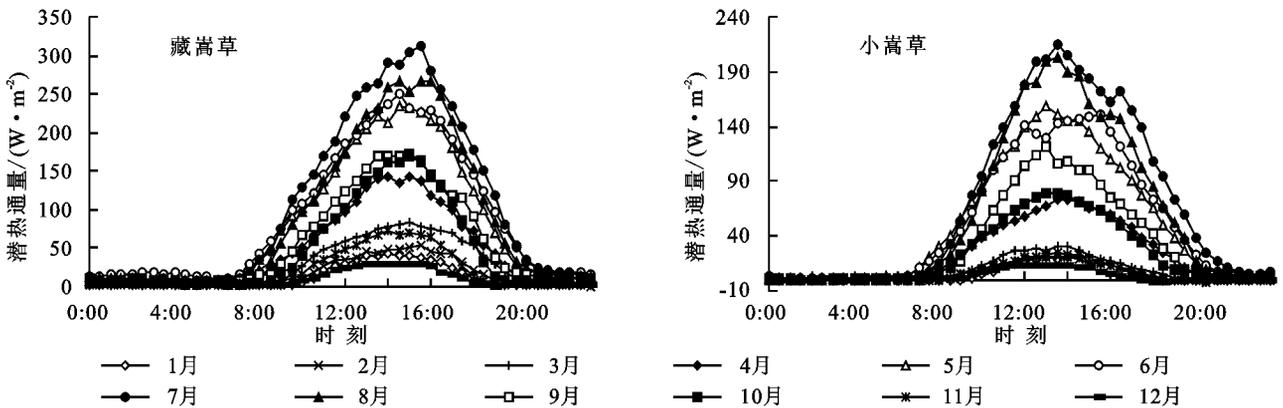


图 5 潜热月平均日变化

2.3 青海湖湿地生态系统能量通量全年平均日变化

由图 6 可知,2 种嵩草湿草甸湿地类型感热通量和潜热通量以及小嵩草湿草甸湿地的土壤热通量的日变化与地表净辐射的变化趋势一致,呈单峰型变化。2 种嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射在 8:00—8:30 由负转正,在 19:00 由正转负。藏嵩草湿草甸湿地生态系统日最大净辐射出现在 13:30,为 430.39 W/m²,小嵩草湿草甸湿地生态系统日最大净辐射出现在 13:00,为 347.54 W/m²。2 种嵩草湿草甸湿地生态系统的感热通量和潜热通量伴随着太阳的升起而逐渐增大,在 13:30—15:00 达到最大,而后随着太阳高度角的减小和温度的降低而逐渐变小。藏嵩草湿草甸湿地生态系统感热最大值出现的时间较净辐射最大值晚 0.5 h,潜热通量晚 1.5 h。小嵩草湿草

甸湿地生态系统感热和潜热最大值出现的时间都较净辐射最大值晚 0.5 h,而土壤热通量最大值出现的时间比净辐射最大值晚 2 h。

2.4 青海湖湿地生态系统能量分配及其闭合特征

由图 7 可知,藏嵩草湿草甸湿地生态系统 4—12 月潜热通量明显高于感热通量,1—3 月感热通量略大于潜热通量;小嵩草湿草甸湿地生态系统生长季潜热通量明显高于感热通量,而非生长季感热略高于潜热通量。土壤热通量变化相对来说不如其他分量剧烈,且所占的比例较低。相同月份,藏嵩草湿草甸湿地生态系统潜热和净辐射月均值都大于小嵩草湿草甸湿地生态系统。由图 8 可知,藏嵩草湿草甸湿地生态系统 1—3 月波文比大于 1,其余月份其值均小于 1,说明 1—3 月该湿地生态系统能量分配以感热为

主,其余月份以潜热为主。2015 年 12 月波文比为负值,主要是由于感热通量为负。小嵩草湿草甸湿地生态系统 5—10 月波文比小于 1,其余月份其值均大于 1,说明 5—10 月小嵩草湿草甸湿地生态系统能量分

配以潜热为主,其余月份以感热为主;能量分配中感热通量在 2 月达到峰值,感热通量约为潜热通量的 5 倍,而潜热通量在 7 月达到顶峰,潜热通量约为感热通量的 3 倍。

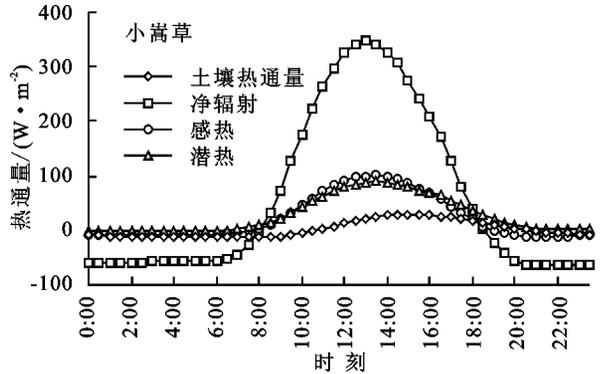
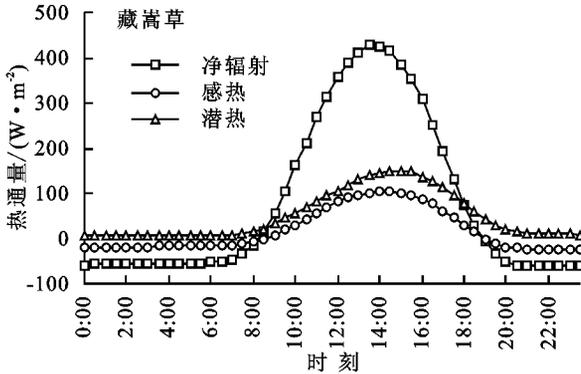


图 6 能量各分量年平均日变化

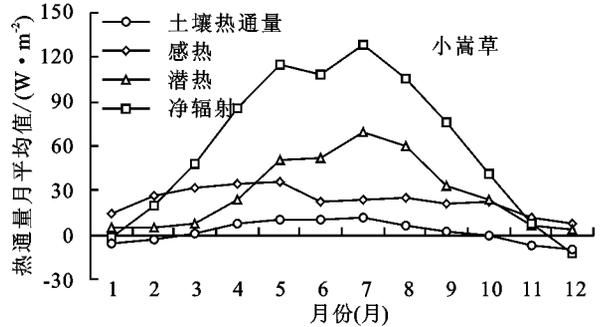
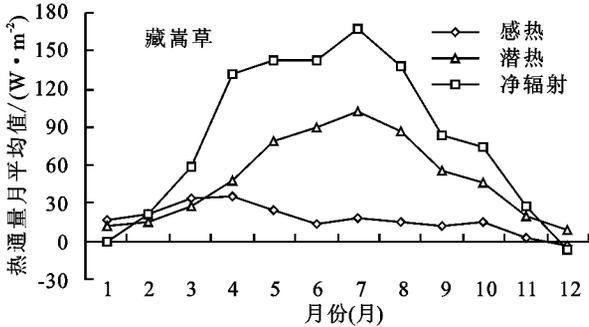


图 7 能量各分量的年际分布特征

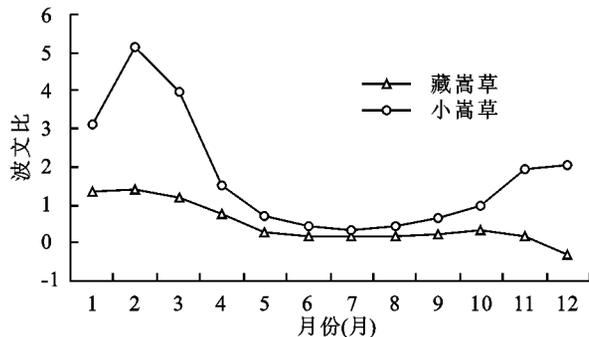


图 8 青海湖高寒湿地 2 种湿地类型各月波文比变化

2015 年藏嵩草湿草甸湿地生态系统年湍流通量 ($LE+H$) 为 $1.17 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,有效能量 (R_n) 为 $1.43 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 0.82;其中生长季湍流通量为 $8.25 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,有效能量为 $1.10 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 0.75;非生长季湍流通量为 $3.48 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,有效能量为 $3.33 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 1.04。2015 年小嵩草湿草甸湿地生态系统年湍流通量为 $9.04 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,有效能量 (R_n-G) 为 $1.01 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 0.89;其中生长季湍流通量为 $6.49 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,有效能量为 $7.84 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 0.83;非生长季湍流通量为 $2.55 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,有效能量为 $2.35 \times 10^5 \text{ W/m}^2$,能量平衡率为 1.09。此外,小嵩草湿草甸湿地生态系统如果不考虑土壤热通量,年有效能量为 $1.05 \times 10^6 \text{ W/m}^2$,能量平

衡率为 0.86。

3 讨论

3.1 青海湖湿地生态系统水分盈亏及不同步性分析

藏嵩草湿草甸湿地生态系统全年水汽通量是降水量的 2.08 倍,说明藏嵩草湿草甸湿地生态系统全年水汽通量高于降水量,特别是植物生长季,易导致水分过多消耗(图 1)。小嵩草湿草甸湿地生态系统全年水汽通量低于降水量,表明水分有盈余(图 2)。小嵩草湿草甸湿地生态系统降水量是藏嵩草湿草甸湿地生态系统的 1.38 倍,水汽通量是藏嵩草的 0.57 倍。两种嵩草湿草甸湿地存在空间分异现象,气象条件与生态系统组成存在差异,可能导致藏嵩草湿草甸湿地生态系统降水量低于小嵩草湿草甸湿地生态系统,蒸散量却高于小嵩草湿草甸湿地生态系统。另外藏嵩草湿草甸生态系统地势平坦,而小嵩草湿草甸湿地生态系统下垫面存在一定的倾斜,易造成水分流失。对比 2 种嵩草湿草甸湿地生态系统降水与水汽通量的同步性规律发现,藏嵩草湿草甸湿地生态系统 7 月 12 日存在 2.03 mm 的降水,其日水汽通量为 3.45 mm,而无雨的 7 月 13 日出现了全年最大的日水汽通量 4.73 mm;小嵩草湿草甸湿地生态系统 7 月 22 日存在 0.51 mm 的降水,其日水汽通量 2.93

mm,而无雨的7月24日出现了全年最大日水汽通量3.93 mm,2地的气水汽通量都滞后于降水。张法伟等^[26]研究表明,降雨天气过程,可以使气温和地表温度日均值下降,空气湿度上升,也可以使太阳总辐射,下垫面反射辐射出现明显的下降,并对热量传输产生重要影响。本研究中的2个研究地点温度,湿度,植被类型以及降雨频率,一次降雨的量等都存在一定的差异,可能共同导致两地水汽通量存在一定的差异性以及对降雨响应的滞后性。刘妹妹等^[27]通过对辽源市水汽通量的研究也发现,降水期间水汽通量相对较低,而降雨结束之后,水汽通量有一个小幅回升。降水是水汽通量的来源,驱动着生物与非生物的过程,但存在一定的时间不同步,主要是降雨固有的内在变异性和生态系统对其的时滞响应^[28]。

3.2 青海湖湿地生态系统能量变化规律

2种嵩草湿草甸湿地生态系统感热通量和潜热通量日变化最大值出现的时间都晚于净辐射最大值出现的时间,这是因为地表净辐射是水热通量的驱动力^[29],在能量转化过程中,又受到植被、土温、降水、风速的影响,使其湍流分量具有延后效应。在2种嵩草湿草甸湿地生态系统中,生长季降水多,温度高,植物蒸腾与土壤蒸发强,潜热在能量分配中达到顶峰,另外也有研究指出生长季能量分配受冠层导度影响^[1,26]。非生长季月份内,小嵩草湿草甸湿地生态系统温度低、降雨量少、土壤较干燥以及植物死亡后地面裸露而使土壤易受热等导致能量交换以感热为主;藏嵩草湿草甸湿地生态系统非生长季除4月和11月外,能量分配以感热为主,4月和11月能量分配以潜热为主,主要是因为4月藏嵩草湿草甸湿地生态系统处于返青期阶段,土温气温快速回升,而影响了热通量在此阶段的分配,对于11月,青海湖未封冻,加上西风影响,使研究区热通量受到湖面蒸发水汽的影响。此外,2种嵩草湿草甸湿地生态系统感热通量在非生长季的2月、3月和4月较大,而11月和12月相对较低。分析发现,在2月和3月2种嵩草湿草甸湿地生态系统都存在一定的降雨量、较低的平均相对湿度和较大的平均风速,4月是植物的返青期,土壤以及植物在这个时期发生较大变化,可能影响此阶段感热通量的传输,而11月和12月可能受到较低气温和土温的影响;王澄海等^[30]的研究有相似发现。2个研究区,都存在季节性冻土,有研究指出土壤冻融过程对地表能量过程也存在一定影响^[31-32]。

3.3 青海湖湿地生态系统能量平衡分析

理论上讲,能量的支出等于收入,能量处于平衡态,但是事实上能量不闭合普遍存在^[33-34]。因此,能量闭合度的高低成为评价通量数据质量好坏的重要

评价方式之一。藏嵩草湿草甸湿地生态系统2015年全年能量平衡率为0.82。小嵩草湿草甸湿地生态系统在不考虑土壤热通量时能量平衡率为0.86,如考虑土壤热通量,能量平衡率为0.89,提高了3%,说明考虑土壤热通量能改善能量平衡状况,但也不能达到完全闭合。2种嵩草湿草甸湿地生态系统在非生长季都存在能量“过闭合”现象,这个可能是由于短时间内,潜热与感热传输滞后净辐射传输所致,另一方面也可能是由于非生长季地面裸露,积雪结冰等引起反射率增大,净辐射减小所致,相关研究也有上面相似的结果^[35-36]。2种嵩草湿草甸湿地生态系统能量都存在不闭合现象,可能与研究中忽略了其他能量收支项以及仪器误差等有关。目前相关研究已经对能量不闭合程度的原因给出了相应的解释^[35-37],但是如何结合研究区自身特性去解释与量化,还需进一步的深入研究。

4 结论

(1)试验期间青海湖藏嵩草湿草甸湿地生态系统年水汽通量大于降水量,存在水分亏损;小嵩草湿草甸湿地生态系统年水汽通量小于降水量,存在水分盈余。2种高寒嵩草湿草甸湿地生态系统水汽通量与降水量存在时间的不同步现象,水汽通量具有一定的时间滞后性。

(2)青海湖2种嵩草湿草甸湿地生态系统能量各分量年日变化具有相同的单峰变化特征。藏嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射月均日变化最大值为648.51 W/m²,感热通量为179.06 W/m²,潜热通量为312.55 W/m²;小嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射月均日变化最大值为510.25 W/m²,感热通量为161.86 W/m²,潜热通量为215.44 W/m²。藏嵩草湿草甸湿地生态系统净辐射与潜热月均值都大于小嵩草湿草甸湿地生态系统。

(3)青海湖2种嵩草湿草甸湿地生态系统在植物生长阶段,能量分配均以潜热为主,非生长季小嵩草湿草甸湿地生态系统感热为主要能量分配项;而藏嵩草湿草甸湿地生态系统除了1月、2月和3月,仍以潜热通量为主要能量分配项。2种嵩草湿草甸湿地生态系统都存在能量不闭合现象,而考虑土壤热通量可以提高能量平衡比率。另外,2种嵩草湿草甸湿地生态系统生长季和非生长季能量闭合都存在一定的差异性,非生长季的能量闭合状况都好于生长季。

参考文献:

- [1] Eichelmann E, Riddle C W, Warland J, et al. Evapotranspiration, water use efficiency, and energy partitioning of amature *switchgrass* stand[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 217(2): 108-119.
- [2] Dennison M S, Berry J F. *Wetlands: Guide to science, law, and technology*[M]. Park Ridge: Noyes Publications, 1993.

- [3] 李英年,赵亮,古松,等. 海北高寒草甸地区能量平衡特征[J]. 草地学报,2003,11(4):289-295.
- [4] Zhang Y Y, Zhao W Z, He J H, et al. Energy exchange and evapotranspiration over irrigated seed maize agroecosystems in a desert-oasis region, northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 223(6):48-59.
- [5] 王根绪,李元寿,王一博,等. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J]. 地理学报,2007,62(5):481-491.
- [6] Zhang Q, Sun R, Jiang G Q, et al. Carbon and energy flux from a *Phragmites australis* wetland in Zhangye oasis-desert area, China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 230/231(11):45-47.
- [7] You Q G, Xue X, Peng F, et al. Surface water and heat exchange comparison between alpine meadow and bare land in a permafrost region of the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232(1):48-65.
- [8] 邢宇,姜琦刚,李文庆,等. 青藏高原湿地景观空间格局的变化[J]. 生态环境学报,2009,18(3):1010-1015.
- [9] Zhao Z L, Zhang Y L, Liu L S, et al. Recent changes in wetlands on the Tibetan Plateau: A review[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7):879-896.
- [10] Zeng X F, Zhao N, Zhai J X, et al. Variation characteristics of water vapor transport and precipitation in the three rivers' headstream region during the recent several decades [J]. Journal of Water Resources Research, 2014, 3(2):95-106.
- [11] 张法伟,李红琴,李英年,等. 青藏高原高寒湿地地表能量分配的动态变化[J]. 草业科学,2008,25(4):14-22.
- [12] 孙向民,王根绪,刘光生. 三江源区高寒湿地生态水文过程研究进展[J]. 水电能源科学,2010,28(11):21-24.
- [13] 张海宏,李凤霞,周秉荣,等. 青藏高原草甸和湿地下垫面陆面特征比较分析[J]. 安徽农业科学,2013(21):9042-9044.
- [14] 曹生奎,曹广超,陈克龙,等. 青海湖高寒湿地生态系统服务价值动态[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1402-1409.
- [15] 姚正毅,李晓英,肖建华. 青海湖滨土地沙漠化驱动机制[J]. 中国沙漠,2015,35(6):1429-1437.
- [16] 赵串串,杨晓阳,张凤臣,等. 青海湖流域湿地现状调查与分析[J]. 陕西林业科技,2007(4):49-51.
- [17] 王有恒,景元书,郭建侠,等. 涡度相关通量修正方法比较[J]. 气象科技,2011,39(3):363-368.
- [18] 朱先进,于贵瑞,王秋凤,等. 仪器的加热效应校正对生态系统碳水通量估算的影响[J]. 生态学杂志,2012,31(2):487-493.
- [19] 吉喜斌,赵文智,康尔泗,等. 仪器表面加热效应对临泽站开路涡动相关系统 CO₂ 通量的影响[J]. 高原气象,2013,32(1):65-77.
- [20] 李春,何洪林,刘敏,等. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. 地球信息科学,2008,10(5):557-565.
- [21] Gu L H, Falge E M, Boden T, et al. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128(3/4):179-197.
- [22] 李泉,张宪洲,石培礼,等. 西藏高原高寒草甸能量平衡闭合研究[J]. 自然资源学报,2008,23(3):391-399.
- [23] Wang S Y, Zhang Y, LÜ S H, et al. Biophysical regulation of carbon fluxes over an alpine meadow ecosystem in the eastern Tibetan plateau [J]. International Journal of Biometeorology, 2005, 60(6):801-812.
- [24] Barr A G, Morgenstern K, Black T A, et al. Surface energy balance closure by the eddy-covariance method above three boreal forest stands and implications for the measurement of the CO₂ flux[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(1/4):322-337.
- [25] 史激光. 典型草原区生长季能量平衡闭合分析[J]. 中国农学通报,2010,26(16):332-336.
- [26] 张法伟,李英年,赵新全,等. 一次降雨过程对青藏高原高寒草甸 CO₂ 通量和热量输送的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(10):1685-1691.
- [27] 刘妹妹,杜平萍,邹鹏跃,等. T639 水汽通量与降水分析[J]. 科技资讯,2013(24):182-182.
- [28] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. Oecologia, 2004, 141(2):254-268.
- [29] 张果,周广胜,阳伏林. 内蒙古温带荒漠草原生态系统水热通量动态[J]. 应用生态学报,2010,21(3):597-603.
- [30] 王澄海,王蕾迪. 西北半干旱区感、潜热通量特征及近年来的变化趋势[J]. 高原气象,2010,29(4):849-854.
- [31] 葛骏,余晔,李振朝,等. 青藏高原多年冻土区土壤冻融过程对地表能量通量的影响研究[J]. 高原气象,2016, 35(3):608-620.
- [32] Yao J M, Zhao L, Gu L L, et al. The surface energy budget in the permafrost region of the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2011, 102(4):394-407.
- [33] 岳平,李耀辉,张良,等. 青藏高原林芝与四川盆地温江地区晴天辐射和能量平衡特征[J]. 冰川冻土,2012,34(6):1328-1335.
- [34] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4):223-243.
- [35] 马虹,陈亚宁,李卫红. 荒漠河岸怪柳(*Tamarix chinensis*)灌丛的能量平衡特征[J]. 中国沙漠,2014,34(1):108-117.
- [36] 郭建侠,卞林根,戴永久. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索[J]. 中国科学(D辑),2008,38(9):1103-1111.
- [37] 李宏宇,张强,赵建华. 论地表能量不平衡的原因及其解决办法[J]. 干旱区研究,2012,29(2):222-232.