

# 科尔沁梯级生态带水热通量动态变化及 对环境因子的响应

黄天宇<sup>1</sup>, 刘廷玺<sup>1,2</sup>, 王冠丽<sup>1,2</sup>, 段利民<sup>1,2</sup>, 陈小平<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

**摘要:**大气边界层内的水热通量在气候系统中起着十分重要的作用。基于大孔径闪烁仪(LAS)科尔沁沙地梯级生态带水热通量2017年3—12月数据,探讨了水热通量与主要环境因子间的关系。结果表明:(1)水热通量日变化特征明显。晴天时显热通量曲线呈单峰状,潜热通量曲线在生长季呈双峰状,非生长季呈单峰状;阴天时显热通量和潜热通量无显著变化规律;土壤热通量曲线在整个研究时段较净辐射曲线表现为稳定的滞后性。(2)水热通量季节性变化显著。通量各月变化曲线峰值出现时间先后移再前移,符合季节变化规律;显热通量在非生长季占净辐射比例较大,生长季时占比降低;潜热通量在整个研究时段占净辐射比例最大,是近地面能量消耗主要形式。(3)太阳净辐射、空气温度、空气相对湿度等气象因子与水热通量的相关性显著;表层10 cm土层土壤与水热通量相关性最好,土壤温度、土壤含水率与水热通量相关性显著,土壤电导率与水热通量相关性不明显。

**关键词:**水热通量;动态变化;相关性分析;大孔径闪烁仪;复杂下垫面

中图分类号:P404

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0122-06

## Dynamic Changes of Water and Heat Fluxes and Responses to Environmental Factors in Cascade Ecological Zone

HUANG Tianyu<sup>1</sup>, LIU Tingxi<sup>1,2</sup>, WANG Guanli<sup>1,2</sup>, DUAN Limin<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaoping<sup>1</sup>

(1. *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*; 2. *Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot 010018, China*)

**Abstract:** The water and heat fluxes in the atmospheric boundary layer play a very important role in the climate system. The large aperture scintillometer (LAS) and meteorological observed data were used to analysis the water and heat fluxes of the cascade ecological zone in Horqin sandy land from March 2017 to December 2017. The response relationship between the water and heat fluxes and the main environmental factors was also analyzed. The results showed that: (1) diurnal variation of the water and heat fluxes in the study period in Horqin sandy land experimentation area was obvious; the sensible heat flux in the sunny days showed a significant single peak and the latent heat flux in the sunny days showed two peaks in growing seasons and one peak in non-growing seasons, which was similar to the homogeneous underlying surface; the sensible heat flux and the latent heat flux showed no significant changes in the cloudy days; the soil heat flux showed a stable lag in the whole research period compared with the net radiation; (2) the seasonal variation of water and heat fluxes in the cascade ecosystem of Horqin sandy land was significant; the peak time of the monthly fluxes curve moved backward first and then moved forward, which was in conformity with the seasonal variation principle; the sensible heat flux accounted for a larger proportion of net radiation in the non-growing season and the proportion decrease in the growing season; the latent heat flux accounted for the

收稿日期:2018-08-08

修回日期:2018-09-03

资助项目:国家自然科学基金重点国际合作研究与重点、地区项目(51620105003, 51139002, 51479086);教育部创新团队发展计划(IRT-17R60);科技部重点领域科技创新团队(2015RA4013)、内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6);内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(NJYT-18-B11)

第一作者:黄天宇(1994—),男,河北廊坊人,硕士研究生,研究方向为干旱区水热通量。E-mail:huangtyy@foxmail.com

通信作者:刘廷玺(1966—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,研究方向为干旱区生态水文。E-mail:txliu1966@163.com

largest proportion of net radiation in the whole research period and it was the main form of energy consumption near the ground; (3) solar radiation, air temperature, relative humidity of air and other meteorological factors showed pretty good correlation with the water and heat fluxes; the correlation between 10 cm soil layer and the water and heat fluxes was the best in all layers of soil. Soil factors like soil temperature and soil moisture content were significantly correlated with the water and heat fluxes; the correlation between soil electrical conductivity and the water and heat fluxes is not obvious.

**Keywords:** water and heat flux; dynamic changes; correlation analysis; large aperture scintillometer; complex underlying surface

大气边界层在气候系统中起着十分重要的作用。其中,边界层内的水热通量是反映地表与大气互相作用的重要指标。大气运动所需要的热能及水汽主要是通过边界层的湍流运动由地表输送到自由大气中去的。同时,地表的热通量又决定了边界层内湍流及扩散的强度和稳定度,并影响着平均风速、温度和湿度等气象因子的变化。因而准确地确定不同尺度生态系统水热通量是近些年国内外广泛关注的热点问题<sup>[1-5]</sup>。我国北方、西北地区干旱少雨,了解大尺度干旱区气候及水分循环对于解决干旱区需水用水问题是极为重要的。

成熟的测量水热通量的方法已有很多,常用的有波文比法、涡度法、机载涡动相关法、大孔径闪烁仪法、遥感法等。其中,大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintilometer,LAS)因其测量精度高,尺度广,自 20 世纪 90 年代中后期以来,被广泛应用于通量的测定,且具有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。国内外已经有不少应用 LAS 观测各种下垫面类型水热通量的研究<sup>[7-16]</sup>,但目前国内将 LAS 应用于荒漠化梯级生态带这样复杂下垫面的研究成果尚未见发表。因此本文利用 2017 年 3—12 月 LAS 观测数据对科尔沁梯级生态带复杂下垫面上的水热通量进行分析研究,探讨不同时间尺度上水热通量的变化特征,剖析水热通量与环境因子的相关关系,为深入研究复杂下垫面地表水热交换、将研究扩展到更大尺度提供基础与参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南边缘,行政区隶属于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼后旗阿古拉镇,地理坐标(122°33′00″—122°41′00″E,43°18′48″—43°21′24″N),该区域属于半干旱大陆性季风气候,年平均气温 6.6℃,多年平均日照时数 2 931.5 h,多年平均降水量 389 mm,且主要集中在 6—9 月。研究区处于农牧过渡带交汇处,区域内分布有沙丘、草甸、农田、湖泊等多种地貌类型。地形总趋势西高东低,南北沙丘高,中间农田、沙质草甸和小型湖泊低。各种下垫面地形呈“阶梯状”分布南北为沙丘,中部为农田、沙质草甸和小型湖泊,植被多样,是典型的沙丘—草甸梯级生态系统。

1.2 观测站点及观测内容

试验区梯级生态带内建有多个生态—气象—土壤环境监测站点,从北至南依次为:半流动沙丘 A4,农田玉米地 BC4,草甸芦苇群落 C4,小型湖泊 E4,固定沙丘半灌木—杂草群落 F4。A4—F4 为大孔径闪烁仪(BLS450,Scintec)观测带,F4 为 LAS 发射端,A4 为接收端。8 月在相邻梯级带设置另一组大孔径闪烁仪(BLS900,Scintec)作为 A4—F4 的对照和精度控制的重复,G3 为 LAS 发射端,A3 为接收端。各站点相关介绍及仪器布设情况见表 1,表 2。

表 1 各站点相关介绍

站点	地貌类型	植被群落	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	研究时段
A4	半流动沙丘	差巴嘎蒿	122.6547	43.6547	205	2017 年 3 月 10 日—12 月 31 日
BC4	农田	玉米	122.6546	43.3427	189	
C4	草甸	芦苇—碱蒿	122.6534	43.3363	184	
E4	小型湖泊		122.6533	43.3308	183	
F4	半固定沙丘	半灌木—杂草	122.6532	43.3268	201	
A3	半流动沙丘	差巴嘎蒿	122.6297	43.3512	211	2017 年 8 月 18 日—12 月 31 日
G3	半固定沙丘	黄柳	122.6299	43.3233	221	

表 2 各站点仪器布设

站点	类别	LAS	净辐射	风速风向	空气温湿度	降水量	土壤温度、土壤水分、土壤电导率	土壤热通量
A4	仪器型号	BLS450,Scintec	CNR-LITE	034B	HMP155A	TE525 MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深	8 m	4.95 m	2.3,5,10 m	2.5,10 m	0.7 m	10,20,40,80,120,160 cm	10,20,40 cm
BC4	仪器型号		NR-LITE2	034B	HMP155A-L	TE525 MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深		3 m	2,3.5 m	2 m	0.7 m	10,20,40,80 cm	10 cm
C4	仪器型号		CNR-LITE	034B	HMP155A	TE525 MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深		2.7 m	2,3,5,10 m	2,5,10 m	0.7 m	10,20,40,80,120,160 cm	10 cm
E4	仪器型号		NR-LITE2	014A	HMP155A	TE525 MM		
	架高/埋深		2 m	2.5 m	2.5 m	0.7 m		
F4	仪器型号	BLS450,Scintec	NR-LITE2	034B	083 E	HOB0 RG3-M	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深	5 m	5 m	2,3,5 m	1.5 m	0.7 m	10,20,40,80,120,160,200 cm	10 cm
A3	仪器型号	BLS900,Scintec	NR-LITE2	034B	HMP155A	TE525 MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深	8 m	1.67 m	1,2,3,5 m	1,2,3,5 m	0.7 m	10,20,40,80,120,160,200 cm	10 cm
G3	仪器型号	BLS900,Scintec	NR-LITE2	03002	083 E	HOB0 RG3-M	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高/埋深	5 m	1.5 m	2,3,5 m	1.5 m	0.7 m	10,20,40,80,120,160,200 cm	10 cm

### 1.3 研究方法

1.3.1 研究原理 光在空气中传播时,受到大气的吸收、扰动等影响会发生相位、强度等的变化,其中光强度的波动(闪烁)最为明显。大孔径闪烁仪就是通过测量值空气折射指数结构参数  $C_n^2$  计算显热通量。

空气折射指数结构参数  $C_n^2$  经过湿度订正来计算,首先确定显热通量有关的温度结构参数  $C_T^2$ ,见式(1)。再结合气象数据、下垫面情况以及光径有效高度,根据莫宁—奥布霍夫相似理论,即可得出  $C_T^2$  和显热通量  $H$  的关系,见式(2),(3),(4)。

$$C_T^2=C_n^2(\frac{T^2}{-0.78\times10^{-6}P})^2(1+\frac{0.03}{\beta})^{-2}$$

(1)

式中: $T$  为温度; $P$  为大气压; $\beta$  为波文比系数。波文比是显热通量和潜热通量的比值。

$$\frac{C_T^2(z-d)^{2/3}}{T_*^2}=f_T(\frac{z-d}{L})$$

(2)

式中: $z$  为 LAS 观测高度(m); $d$  为零平面位移(m)( $d=0.667 H_{植被}$ ); $L$  为莫宁—奥布霍夫长度(m); $f_T$  为温度结构参数的稳定度普适函数。

$$T_*=\frac{H}{\rho_a C_p u_*}$$

(3)

式中: $H$  为显热通量,也称感热通量( $W/m^2$ ); $T_*$  为温度尺度; $\rho_a$  空气密度( $kg/m^3$ ); $C_p$  为空气定压比热 [ $J/(kg\cdot K)$ ]; $u_*$  为摩擦速度( $m/s$ )。

$$H=\frac{\rho_a C_p u_* (z-d)^{1/3} T_*^2}{0.78\times10^{-6}P(1+\frac{0.03}{\beta})}\sqrt{f_T(\frac{z-d}{L})}$$

(4)

1.3.2 数据处理 LAS 原始数据采集频率记录时间间隔为 1 min,包括降雨时段数据和过饱和数据。为了更好的表征通量变化,将数据剔除、筛选、插补、

校正、平均后得到 30 min 值进行通量研究。本次试验 LAS 数据饱和上限为  $4.11 E-14 m^{-2/3}$ 。

气象土壤环境监测数据的采集频率记录时间间隔均为 10 min,包括无效值。将数据剔除、筛选、插补、平均后得到 30 min 数据,各监测站点数据根据其处于 LAS 的光径位置和 LAS 源区面积进行加权,将结果与 LAS 数据同步分析。

显热通量迭代过程用 JAVA 来实现,数据整理与分析采用 Excel,SPSS 和 SRun 1.31,SRun 1.48 软件来处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 水热通量变化规律

2.1.1 研究区水热通量的日变化及分配特征 选择观测时段内植被生长旺季(夏季)和非生长季(冬季)典型晴天与阴天各一天进行分析,探讨净辐射( $R_n$ )、显热通量( $H$ )、潜热通量(LE)和土壤热通量( $G$ )的日变化特征。其中,生长季典型晴天、阴天分别选择 2017 年 7 月 5 日、7 月 6 日;非生长季典型晴天、阴天选择同年 12 月 6 日、12 月 10 日。各典型日日变化特征如图 1 所示。

典型晴天能量各收支项在生长季(夏季)和非生长季(冬季)均呈现显著的日变化。其中,显热通量在整个观测时段呈明显的倒“U”型单峰趋势,而潜热通量表现为夏季呈双峰趋势,冬季呈单峰趋势。峰值均在正午前后达到最大值。植被生长季潜热通量的峰值  $433.5 W/m^2$  占净辐射的 65.63%,远大于显热通量的峰值  $152.4 W/m^2$ ,是生长季近地表耗能的主要形式;非生长季潜热通量与显热通量的峰值接近,均

在  $100\text{ W/m}^2$  左右。土壤热通量在生长季占净辐射的比例约为 7%，非生长季则全天为负值。土壤热通

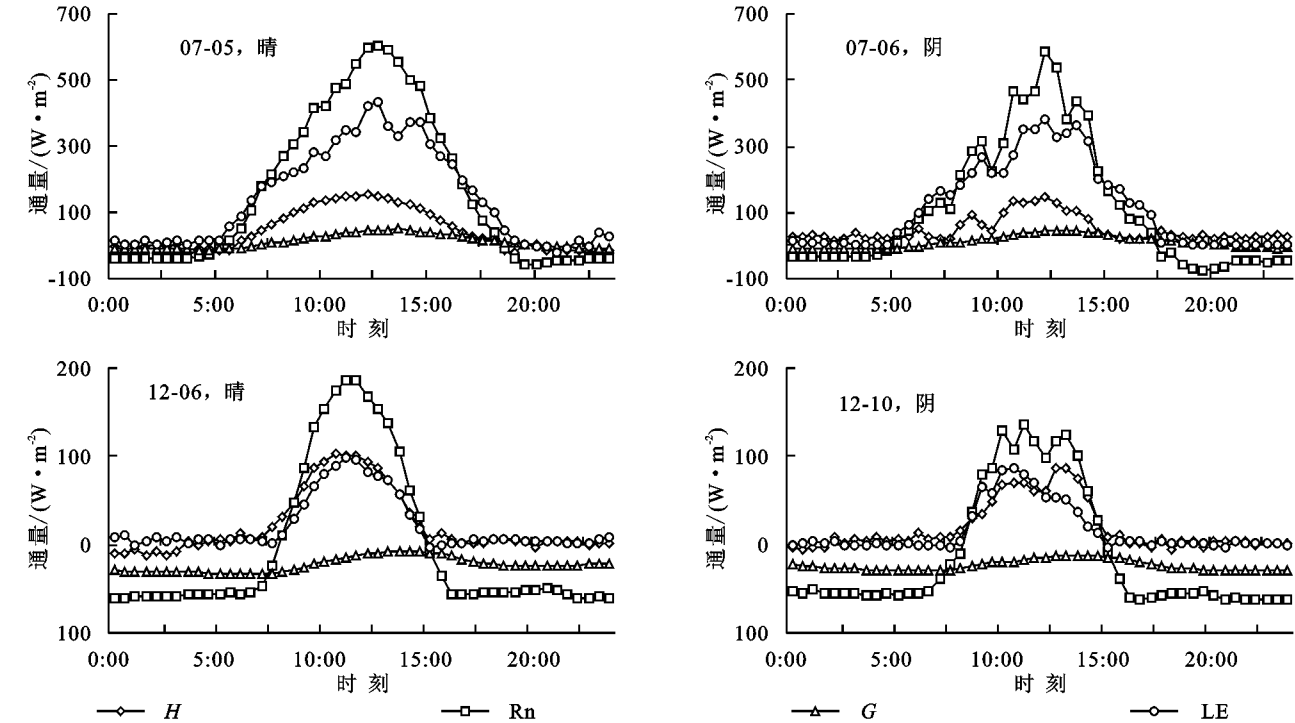


图 1 生长季和非生长季典型晴天、阴天地表能量收支各分量日变化

阴天条件下生长季和非生长季的日峰值和日均值均小于同时期晴天条件观测值，地表能量平衡各项分量日变化曲线出现锯齿状波动，与实际天气条件有关。但土壤热通量峰值仍表现出较稳定的滞后性。阴天时日峰值和日均值均小于同时期晴天条件，阴天地表能量接收较少，地面温度降低，水热通量降低，向上传到土壤的热通量也减少。

总的来说，生长季水热通量日变化曲线表现为“高而宽”，非生长季“矮而窄”。

2.1.2 研究区水热通量月变化及分配特征 将 LAS 观测时段各月份(BLS450 观测时段为 2017 年 3 月 10 日—12 月 31 日,BLS900 观测时段为同年 8 月 18 日—12 月 31 日)处理后得到天尺度数据，再平均到月尺度得到能量平衡各分量月均日变化图，见图 2。

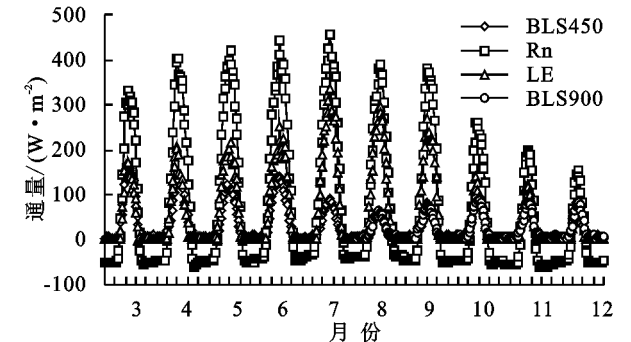


图 2 研究区净辐射和水热通量月均日变化

各月显热通量月变化曲线呈显著单峰状，6 月峰

量峰值较净辐射表现出一定滞后性，其中生长季季滞后 1~2 h，非生长季滞后 2~3 h。

值最大，为  $154.17\text{ W/m}^2$ ；8 月峰值最低，为  $60.57\text{ W/m}^2$ 。3—12 月峰值出现时间依次为 11:00, 11:00, 11:00, 11:30, 12:00, 12:00, 12:00, 12:00, 11:30, 11:30，其中 3—5 月份峰值出现在 11:00、6 月份峰值出现在 11:30，7—10 月份为 12:00，11、12 月份出现在 11:30。峰值在月尺度上出现的时间先后移再前移，符合季节变化规律。

生长季各月潜热通量月变化曲线呈主次双峰状，非生长季呈单峰状。7 月峰值最大，为  $335.45\text{ W/m}^2$ ；12 月峰值最低，为  $63.14\text{ W/m}^2$ 。整个研究时段潜热通量占净辐射比例较大，非生长季时显热通量占比升高，生长季下降。潜热通量是地表能量的主要耗能形式。

2.2 生长季各月典型晴天不同环境因子与水热通量的相关性

将各气象站观测到的 14 个气象环境因素加权后与计算得到的显热通量、潜热通量值做相关性分析，结果见表 3、表 4。

水热通量与气象因子的相关性很好，显热通量、潜热通量与净辐射相关性都达 0.96 以上，与风速、空气温度、空气相对湿度、空气相对水汽压都有较好的相关关系。

各层位土壤因子与水热通量呈良好相关性，表层土壤相关性最好，显热通量与各层位土壤温度多呈正相

关,与土壤含水率多呈负相关,与土壤电导率相关性一般;10 cm 土壤相关性最好。其中各月土壤温度与水热通量的相关性在 0.7 左右,各月土壤含水率与水热通量的相关性在-0.7 左右。层位越深相关性越低。

表 3 各月典型晴天不同环境因子与显热通量  $H$  的相关系数

环境因子	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
Rn	0.976**	0.969**	0.985**	0.961**	0.981**	0.960**
WS	0.882**	0.843**	0.834**	0.850**	0.894**	0.908**
AT 2 m	0.760**	0.654**	0.769**	0.706**	0.700**	0.687**
RH 2 m	-0.700**	-0.622**	-0.708**	-0.665**	-0.676**	-0.596**
$e$ 2 m	-0.462**	-0.272	-0.578**	-0.386**	-0.630**	-0.578**
ST 10 cm	0.691**	0.685**	0.708**	0.683**	0.623**	0.699**
VWC 10 cm	-0.714**	-0.711**	-0.755**	-0.685**	-0.668**	-0.723**
$E$ 10 cm	-0.012	-0.045	-0.297*	-0.056	-0.281	-0.256
ST 20 cm	-0.293*	-0.574**	-0.350*	-0.672**	-0.759**	-0.449**
VWC 20 cm	-0.311*	-0.180	-0.720**	-0.343*	-0.271	-0.453**
$E$ 20 cm	-0.317*	-0.498**	-0.470**	0.2106	-0.579**	-0.537**
ST 40 cm	-0.754**	-0.436**	-0.595**	-0.632**	-0.461**	-0.250
VWC 40 cm	-0.443**	-0.186	-0.492**	-0.233	-0.227	-0.307*
$E$ 40 cm	-0.574**	-0.234	-0.674**	0.190	0.131	0.033

注:(1) \* 在 0.05 水平上显著相关, \*\* 在 0.01 水平上显著相关;(2)  $H$  为显热通量,Rn 为净辐射,WS 为风速,AT 为空气温度,RH 为空气相对湿度, $e$  为空气相对水汽压,ST 为土壤温度,VWC 为土壤含水率, $E$  为土壤电导率。

表 4 各月典型晴天不同环境因子与潜热通量  $LE$  的相关系数

环境因子	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
Rn	0.977**	0.986**	0.986**	0.990**	0.979**	0.976**
WS	0.767**	0.903**	0.842**	0.931**	0.907**	0.922**
AT 2 m	0.595**	0.676**	0.779**	0.829**	0.701**	0.733**
RH 2 m	-0.525**	-0.639**	-0.724**	-0.783**	-0.676**	-0.641**
$e$ 2 m	-0.245	-0.414**	-0.641**	-0.407**	-0.618**	-0.516**
ST 10 cm	-0.030	0.029	0.088	0.081	0.208	0.131
VWC 10 cm	0.123	0.173	0.795**	0.518**	0.250	0.890**
$E$ 10 cm	-0.225	-0.014	-0.275	0.137	-0.285*	-0.190
ST 20 cm	-0.495**	-0.568**	-0.271	-0.617**	-0.737**	-0.372**
VWC 20 cm	0.217	0.243	0.785**	0.389**	0.261	0.366*
$E$ 20 cm	-0.517**	-0.486**	-0.425**	0.332*	-0.570**	-0.464**
ST 40 cm	-0.739**	-0.460**	-0.496**	-0.678**	-0.440**	-0.297*
VWC 40 cm	0.259	0.566**	0.561**	0.602**	0.608**	0.251
$E$ 40 cm	-0.402**	-0.291*	-0.705**	0.149	0.127	-0.042

注:(1) \* 在 0.05 水平上显著相关, \*\* 在 0.01 水平上显著相关(2)  $LE$  为潜热通量,Rn 为净辐射,WS 为风速,AT 为空气温度,RH 为空气相对湿度, $e$  为空气相对水汽压,ST 为土壤温度,VWC 为土壤含水率, $E$  为土壤电导率。

3 讨论

本研究显示,试验观测时段内梯级生态带水热通量晴天日变化趋势明显,显热通量全时段呈单峰状,潜热通量夏季表现为双峰状,冬季呈单峰状,这是因为夏季清晨和下午环境适宜,蒸腾作用强烈;午间温度过高,植被气孔闭合,进入“午休”状态,导致蒸腾作用下降,潜热通量降低。冬季植被凋零死亡,植被不

进行蒸腾作用较弱,亦无“午休”。水热通量阴天变化无明显规律。总的来说,水热通量日变化曲线生长季表现为“高而宽”,非生长季“矮而窄”,研究结果与前人在各种下垫面类型上的结果一致<sup>[13,17-19]</sup>。

月尺度上显热通量变化趋势明显,各月均为单峰状且峰值出现的时间先后移再前移,与前人研究一致<sup>[14]</sup>。但前人的研究结论未出现 8 月净辐射和显热通量峰值降低的情况。这是因为在本次研究时段内,研究

区8月出现了连续降雨,研究区各类植被快速生长,蒸腾量增大,近地表用于潜热交换的能量比例增大导致用于显热通量的能量降低。前人研究表明,农田、草地等下垫面以潜热交换为主<sup>[7-8,18-19]</sup>,戈壁、荒漠等地区近地表能量多用于显热交换<sup>[20-21]</sup>。本文研究下垫面条件复杂,植被生长季内净辐射多用于潜热交换,而非生长季显热通量占比较大,3月、4月是非生长季,显热通量占比较大;5月开始研究区部分植被转绿且农作物播种,此时地表大多裸露,显热通量占比仍较大;7月起植被进入快速生长期,研究区腾发作用强烈,净辐射主要用于潜热交换;9月研究区内开始人工收割芦苇和农作物,潜热降低,显热通量增大;10月后天气变冷,天然植被逐步凋零死亡,用于显热交换的能量进一步增大,为研究时段内的最大值。

尽管研究区内下垫面较复杂,但气象因子受下垫面影响较小,相关性分析结果与前人研究结果一致<sup>[15-16]</sup>。表层10 cm土层土壤表层与水热通量相关性最好<sup>[15]</sup>,土壤温度与含水率与水热通量的相关性也与前人在人工树林、农田、绿洲—荒漠过渡带等均一下垫面的研究类似<sup>[15,22-25]</sup>。总的来说,目前有关复杂下垫面情况土壤因子与水热通量的研究较少,还有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 研究区水热通量晴天日变化中:日显热通量曲线呈单峰状,生长季潜热通量曲线呈双峰状,非生长季呈单峰状。显热通量和潜热通量阴天变化无规律。土壤热通量曲线较净辐射曲线表现为稳定的滞后性。水热通量曲线植被生长季表现为“高而宽”,非生长季“矮而窄”,与均一下垫面变化规律一致。

(2) 研究区水热通量月变化中:显热通量6月峰值最大,8月最低;潜热通量7月峰值最大,12月最低;潜热通量在整个研究时段占比较大,是近地表能量的主要耗能形式。

(3) 相关性分析表明,太阳净辐射、空气温度、空气湿度等主要气象因子与水热通量的相关性显著;表层10 cm土层土壤与水热通量相关性最显著,层位越深相关性越低;土壤温度、土壤含水率与水热通量相关性显著,土壤电导率与水热通量相关性不明显。

### 参考文献:

[1] Baldocchi D, Falge E, Gu L, 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 Meteorologi-*

*cal Society*, 2001, 82(82): 2415-2434.

[2] 刘罡, 蒋维楣, 罗云峰. 非均匀下垫面边界层研究现状与展望[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 223-230.

[3] 周淑贞. *气象学与气候学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

[4] Aubinet M, Vesala T, Papale D. Eddy Covariance: A practical guide to measurement and data analysis[J]. Springer, 2012: 365-376.

[5] Kidston J, Brummer C, Black T A, et al. Energy balance closure using eddy covariance above two different land surfaces and implications for CO<sub>2</sub> flux measurements[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2010, 136(2): 193-218.

[6] 刘绍民, 李小文, 施生锦, 等. 大尺度地表水热通量的观测、分析与应用[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1113-1127.

[7] Meijninger W M L, Bruin H A R D. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer[J]. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2000, 229(1/2): 42-49.

[8] Asanuma J, Iemoto K. Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 333(1): 58-67.

[9] Randow C V, Kruijt B, Holtslag A A M, et al. Exploring eddy-covariance and large-aperture scintillometer measurements in an Amazonian rain forest[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(4): 680-690.

[10] 白洁, 刘绍民, 丁晓萍, 等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1148-1165.

[11] 徐自为, 黄勇彬, 刘绍民. 大孔径闪烁仪观测方法的研究[J]. *地球科学进展*, 2010, 25(11): 1199-1207.

[12] Xu Z, Liu S, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hi-WATER-MUSOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(23): 13-13, 157.

[13] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24-38.

[14] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 714-723.

[15] 黄妙芬, 刘绍民, 朱启疆. LAS测定显热通量的影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(4): 133-138.

[16] 吴海龙, 余新晓, 张艳, 等. 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*, 2013, 20(4): 160-165, 171.

[17] 郝小翠, 张强, 岳平, 等. 黄土高原影响 LAS观测显热通量的物理因素分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(4): 957-966.

Mann-Kendall 法,有序聚类分析法,云模型和滑动平均—马尔科夫模型等方法的有机结合,系统地研究了华山地区 61 a 来降水变化规律并预测了未来 10 a 降水量的变化情况。该研究结果不但丰富了华山地区气候研究的内容,而且对该地区水土保持方案规划与实施、自然灾害防治具有指导性。

#### 参考文献:

- [1] 钟祥浩. 推动山地学学科建设促进山区可持续发展[J]. 山地学报, 1999, 17(1): 14-19.
- [2] 王效科, 欧阳志云, 肖寒, 等. 中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 14-19.
- [3] 陈维杰. 降水变化对不同下垫面的水土流失之差异影响[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 73-75.
- [4] 裴益轩, 郭民. 滑动平均法的基本原理及应用[J]. 火炮发射与控制学报, 2001, 22(1): 21-23.
- [5] 孙乐强, 郝振纯, 王加虎, 等. 滑动平均处理对 Markov 年降水预测精度的影响[J]. 人民黄河, 2012, 34(5): 28-31.
- [6] 方开泰. 聚类分析(I)[J]. 数学的实践与认识, 1978, 31(2): 55-63.
- [7] 唐共地, 包赢. 基于有序聚类分析法和 Mann-Kendall 法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技, 2015, 37(6): 35-37.
- [8] 汪峰. 长江安徽段径流演变规律分析[J]. 人民长江, 2015, 46(S1): 67-68.
- [9] 徐泽华, 韩美, 张广彩, 等. 山东降水时空分布变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 272-278.
- [10] 付斌, 李道国, 王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 420-426.
- [11] 杨洁, 王国胤, 刘群, 等. 正态云模型研究回顾与展望[J]. 计算机学报, 2018, 41(3): 724-744.
- [12] 徐盼盼, 张奇莹, 钱会, 等. 宝鸡地区降水特征分析及降水量预测[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 63-69.
- [13] 秦松. 基于加权的滑动平均—马尔科夫预测模型及其应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(1): 185-188.
- [14] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均—加权马尔科夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2010, 31(1): 6-9.
- [15] 吴林川, 孔婴婴. 加权马尔种夫链在榆林市降水量预测中的应用[J]. 人民珠江, 2018, 39(2): 5-7, 13.
- [16] 张杰, 陶望雄, 王青. 加权马尔科夫链在济南市降水量预测中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 13-16.
- [17] 刘政鸿. 陕西省近 50 年来降水量时空变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 107-112.
- [18] 田中伟, 尹贞铃, 许伟峰. 渭南市近 50 年秋淋气候特征分析[J]. 陕西气象, 2012, 55(6): 25-27.
- [19] 刘全玉, 易亮. 基于奇异谱分析的未来 30 年华山地区降水趋势预测[J]. 渭南师范学院学报, 2011, 26(2): 73-75.
- [20] 丁晶, 高荣松, 邓育仁. 随机水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [21] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, 30(5): 35-37.
- [22] 袁满, 王文圣, 叶瀛麟. 有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J]. 水文, 2017, 37(5): 8-11.
- [23] 刘德地, 陈晓宏, 楼章华. 基于云模型的降雨时空分布特性分析[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 850-857.
- [24] 郭春梅, 陈海涛, 李阿龙. 云模型在中长期降水预测中的应用[J]. 人民黄河, 2016, 38(7): 1-4.
- [25] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 4198-4201.
- [26] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报, 1997, 28(8): 15-21.

(上接第 127 页)

- [18] 隋娟, 龚时宏, 王建东, 等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 148-152.
- [19] 李玉, 康晓明, 郝彦宾, 等. 黄河三角洲芦苇湿地生态系统碳、水热通量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4400-4411.
- [20] 王润元, 刘宏谊, 张强, 等. 夏季草原与戈壁地表能量分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 642-648.
- [21] 王慧, 胡泽勇, 马伟强, 等. 鼎新戈壁下垫面近地层小气候及地表能量平衡特征季节变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(6): 1458-1470.
- [22] 闫人华, 熊黑钢, 冯振华, 等. 绿洲—荒漠过渡带芨芨草地 SPAC 系统蒸散与多环境因子关系分析[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 889-896.
- [23] 谢琰, 文军, 刘蓉, 等. 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.
- [24] 龚婷婷, 雷慧闽, 焦阳, 等. 黄土高原农牧交错带稀疏自然植被生态系统的能量特征[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1625-1633.
- [25] 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 773-784.