

异质下垫面显热通量动态变化及对环境因子的响应

吴海龙¹, 余新晓¹, 张艳¹, 李轶涛¹, 刘旭辉¹, 黄枝英²

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室,

北京 100083; 2. 江西省赣西土木工程勘测设计院, 江西 宜春 336000)

摘 要:利用 2010 年 7 月至 2011 年 6 月大孔径闪烁仪的观测数据分析了显热通量的变化规律,通过主成分分析和相关性分析,筛选出影响显热通量的主要控制因子,探讨了鹭峰站点复杂下垫面水热通量对环境因子的动态响应。结果表明:(1) 鹭峰站点显热通量日变化规律与平坦(或均匀)下垫面相似,即显热通量与天气条件密切相关,具有明显的季节性变化规律。4 个典型晴天均有峰值出现,从年初至年末显热通量峰值从中午 11:00 左右向上午偏移;秋分日显热通量波动最明显,冬至日波动较为平缓;夏至日显热通量值最大,处于波峰期,冬至日显热通量值最小,处于波谷期。(2) 土壤温度、土壤含水量、空气温度、下垫面蒸散发、风速、风向以及太阳净辐射是影响显热通量传输的主导因子,且不同典型晴天的主导因子不同。(3) 土壤含水量和土壤温度与显热通量具有极显著相关性,受下垫面植被组成复杂,地形起伏大等因素的影响,风向与风速与显热输送也表现出了显著的相关性。研究结果有助于加强对复杂山区显热通量规律的认识。

关键词:显热通量; 动态变化; 主成分分析; 异质下垫面; 大孔径闪烁仪(LAS); 相关性分析

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)04-0160-06

Dynamic Changes in Sensible Heat Flux of Heterogeneous Surface and Response to Environment Factors

WU Hai-long¹, YU Xin-xiao¹, ZHANG Yan¹, LI Yi-tao¹, LIU Xu-hui¹, HUANG Zhi-ying²

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification

Combating of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Civil Engineering Survey and Design Institute of Jiangxi Province, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract:One year LAS(Large Aperture Scintillometers(LAS)) and meteorological observed data were employed to investigate sensible heat flux over heterogeneous surface from July 2010 to June 2011. The main impacting factors on sensible heat were selected via principal component analysis and correlation analysis. The results showed that: (1) the sensible heat flux in Jiufeng park was closely related to the weather changes and varied in different seasons which was similar to that over plane surface or uniform terrain. Peak values were observed in all four typical sunny days and it moved to morning from 11 o'clock during a year. The sensible fluctuation was the most obvious in September equinox and winter solstice was the least. The sensible heat was maximum in June solstice and least in winter solstice; (2) the principal component analysis suggested that soil temperature, soil moisture, air temperature, ET, wind speed, wind direction and Rn were the main impact factors while the dominant factors were different in different typical sunny days; (3) soil moisture and soil temperature showed the most significant correlation with H, wind speed and wind direction also expressed significant correlation with H because of the complex vegetation and terrain. The results would be helpful for understanding sensible heat flux in complex mountain areas.

Key words:sensible heat flux; dynamic change; principal component analysis; heterogeneous underlying surface; large aperture scintillometers(LAS); correlation analysis

收稿日期:2012-12-21

修回日期:2013-01-28

资助项目:林业公益性行业科研项目“典型森林植被对水资源形成过程的调控研究”(201104005)

作者简介:吴海龙(1986—),男,重庆巫山人,博士研究生,主要研究方向:森林水文、水土保持。E-mail:petera@bjfu.edu.cn

通信作者:余新晓(1961—),男,甘肃平凉人,教授,博士生导师,主要研究方向:水土保持。E-mail:yuxinxiao@bjfu.edu.cn

自 20 世纪 90 年代中后期开始,大孔径闪烁仪 (Large Aperture Scintillometer, LAS) 被广泛用于大尺度水热通量的测量,使地表水热通量的研究逐渐从传统的点或斑块尺度转向区域,避免了由于实际下垫面的复杂性和非均匀性造成较大的误差^[1-3]。测量水热通量的常用方法有波文比—能量平衡法、涡动相关法、梯度扩散法、遥感模型法以及大孔径闪烁仪法^[1,4-6]。到目前为此,对于起伏大,下垫面复杂的非均一地表通量观测最为有效的方法是大孔径闪烁仪^[7-10]。大孔径闪烁仪的测量范围为 0.5~10 km,其观测尺度恰好符合遥感数据的最小单元^[11-12]。

国内外对于大孔径闪烁仪的研究历史并不长,国外于上世纪九十年代开始大量研究而国内起步相对较晚,到目前为止北师大的刘绍民教授课题组在这方面做了大量研究^[13-14],其余高校和科研单位也有许多学者进行了相关实验。黄妙芬等^[15]对大孔径闪烁仪测定显热通量的影响因子进行了分析,其研究表明, LAS 测定的显热通量与天气条件密切相关,10 cm 土层的土壤水分与 LAS 显热通量相关系数达 -0.87; 土壤表面温度与 LAS 显热通量相关系数高达 0.9 以上。白洁等^[16]对海河流域不同下垫面上 LAS 观测的显热通量特征进行了分析,指出显热通量有明显的季节变化特征,且与下垫面植被存在密切关系。王维真等^[17]通过对黑河流域不同下垫面水热通量特征的分析指出,各能量收支分量有明显的日变化和季节变化趋势。

大孔径闪烁仪测定热通量的原理是在弱湍流以及传播路径均匀的条件下,光强度自然对数的方差 ($\delta_{\ln I}^2$) 与空气折射指数 (C_n^2) 的结构参数存在确定的线性关系,基于此原理小孔径闪烁仪被广泛用于测定较短路径的平均空气折射指数的结构参数。但当路径和下垫面复杂化之后, $\delta_{\ln I}^2$ 与 C_n^2 之间的线性关系不再成立,虽然一些研究^[18-21]基于 Clifford 理论设计了大孔径闪烁仪,这有效地解决了路径长的问题,但是对于下垫面复杂的山区仍然少有研究。

本文尝试利用 2010 年 7 月—2011 年 6 月首都生态圈生态站的 LAS 观测数据对北京典型土石山区复杂下垫面显热通量特征进行分析,包括典型日、月和季节变化特征;以及对典型日显热通量与土壤温湿度和空气温湿度,风速风向,太阳辐射等常规因子之间的相互关系进行分析,为深入研究复杂下垫面水热通量提供理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区位于北京市海淀区西山林场鹫峰国家

森林公园 (40°03'46"N, 116°05'45"E), 海拔 100~1 150 m, 属燕山山脉余脉, 地处海淀区和门头沟区交界处。观测站地面气象观测数据统计, 年平均气温为 11.6℃, 平均风速 4.1 m/s, 年平均降水量 630 mm, 70% 的降水量集中在 7—8 月, 年蒸发量约为 1 800 mm^[22], 属暖温带大陆性气候。观测站主要树种有栓皮栎 (*Quercus variabilis* Blume), 侧柏 (*Platycladus orientalis* Linn. Franco) 和油松 (*Pinus tabulaeformis*), 亦有荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*), 孩儿拳头 (*Grewia biloba* var. *parviflora* Hand. Mazz), 山杏 (*Prunus armeniaca*) 以及小叶鼠李 (*Rhamnus parvifolia* Bunge) 等灌木。

1.2 研究方法

1.2.1 大孔径闪烁仪工作原理 大孔径闪烁仪由王庭义于 1978 年基于闪烁法提出设想, 后由美国 NOAA 波传播实验室研制成功^[22]。仪器包括发射端, 接收端以及数据处理中心。Wang 等^[21]的研究表明, 发射器发射经过高频调制的一定波长的波束后, 接收器接收到孔径范围内受光程路径上温度、湿度和气压扰动影响的光束, 并对接收到的信号进行放大、解调及计算处理, 从而得到空气折射指数的结构参数 C_n^2 ($\text{m}^{-2/3}$), 见式(1)。利用测量的 C_n^2 及相关的空气温度 (T_a)、气压 (P) 等数据, 可以计算温度的结构参数 C_T^2 ($\text{K}^2 \cdot \text{m}^{-2/3}$)^[17]。最终由 C_T^2 求得表面显热通量值, 见式(3)^[15]。

$$C_n^2 = 1.12 \delta_{\ln I}^2 D^{7/3} L^{-3} \quad (1)$$

式中: $\delta_{\ln I}^2$ ——光强 I 自然对数的方差; D ——光学孔径 (m); L ——光程长度 (m)。

$$C_T^2 = C_n^2 \left(\frac{T_a^2}{7.9 \times 10^{-7} P} \right)^2 \left(1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2} \quad (2)$$

式中: β ——波文比 (无量纲), 引入了此项是考虑到湿度脉动的影响; P ——大气压 (Pa); T_a ——参考高度的空气温度 (K)。

$$H = \rho C_p \frac{(z-d)^{1/3} u_* \sqrt{C_T^2}}{\sqrt{a_1}} (1 - a_2 \frac{z-d}{L})^{1/3} \quad (3)$$

式中: H ——显热通量 (W/m^2); ρ ——空气密度 (kg/m^3); C_p ——空气定压比热 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; z ——高度 (m); d ——位移高度 (m); u_* ——摩擦速度 (m/s); L ——奥布赫夫长度 (m); a_1, a_2 ——系数, 在不同的文献中的取值不同。

1.2.2 仪器布设 大孔径闪烁仪 (BLAS450, 德国) 发射端安装于海拔 760 m 的山顶, 接收端位于海拔 120 m 的山脚下, 仪器安装高度为 10 m, 光程长度 2 290 m。光程沿途的植被变化从低海拔到高海拔依

次为阔叶乔木,针阔混交乔木,灌木,针叶林和灌木。在发射端,接收端及两者之间分别安装有自动气象站用于观测雨量、风速、风向、大气压强、空气温湿度、太

阳总辐射等。靠近接收端安装一台 Em50(美国 Decagon 公司)用于分层测定土壤温湿度(2,5,10,15,20 cm)。站点详细布设与仪器配置信息见表 1。

表 1 站点详细布设与仪器配置

位置	仪器名称及型号	生产厂家及产地	安装高度/m	观测指标	数据采集频率
发射端	大孔径闪烁仪 BLS450	SCINTEC 德国	10	显热通量	1 min
	HOBO 气象站	Onset 美国	1.8	降雨量、风速、风向、大气压强、空气温湿度、净辐射、蒸散	5 min
光径中心位置	WeatherHawk 510 气象站	WeatherHawk 美国	1.8	降雨量、风速、风向、大气压强、空气温湿度、净辐射、蒸散	5 min
	Em50 土壤水分温度电导率测定仪	Decagon 美国	地下 0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2	土壤温度、湿度和电导率	5 min
接收端	大型科研级气象站	Combell 美国	10	降雨量、风速、风向、大气压强、空气温湿度、太阳总/净辐射,地面辐射(1.8 m),模拟蒸散(1.3 m)	5 min
	大孔径闪烁仪 BLS450	SCINTEC 德国	10	显热通量	1 min

1.2.3 数据采集与处理

(1) 大孔径闪烁仪数据。大孔径闪烁仪的数据处理包括数据的筛选,缺失数据的插补,数据质量控制,及无效数据剔除等^[23]。观测站仪器的记录频率为 1 min,由数据采集器自动存储原始数据,为了更好地表征生态系统显热通量动态变化,本研究中各变量均采用 30 min 平均值计算。

(2) 辅助数据。气象站与 Em50 土壤水分温度电导率测定仪数据采集频率均为 5 min,取 30 min 内的平均值作为分析数据。数据整理与分析运用 Excel 2010 和 SPSS 18 统计软件,作图软件采用 Sigmaplot 11。

2 结果与分析

2.1 典型晴天显热通量变化规律

以春夏秋冬 4 个季节为划分标准并结合实际天气和数据采集情况,选择 4 个典型日(2010-07-08, 2010-09-23, 2010-12-22, 2011-03-21)对显热通量的变化规律进行分析,数据时间序列为 24 h,结果见图 1。7 月 8 日、9 月 23 日、12 月 22 日、3 月 21 日的日显热通量平均值分别为 32.165, 21.487, 11.942, 15.943 w/m²,夏至日显热通量值最大,冬至日显热通量值最小,春分和秋分日峰值位于两者之间。夏至日前后为植被生长的旺盛期,植被各项生理活动旺盛,尤其是对水分的吸收和蒸腾蒸发强烈。下垫面植被生长活动对森林小气候的影响很大,因此该时段显热通量值较大,植被非生长期显热通量值明显降低。

4 个典型日在凌晨 3:00 和中午 11:00 左右均有峰值出现,3 月 21 日、7 月 8 日、9 月 23 日、12 月 22 日达到最大峰值的时间分别是 11:28, 10:28, 09:06, 01:43,从年初到年末显热通量的日变化峰值时间逐渐从中午向上午偏移。秋分日显热通量值波动最为明显,冬至日显热通量值波动较为平缓,说明秋分日是湍流最活跃的时期。

2.2 日变化规律的环境控制

4 个典型晴天显热通量值变化规律不同,其影响因素也不同,利用主成分分析对显热通量值与土壤温湿度、空气温湿度、风速、风向、下垫面蒸发散、太阳辐射等 16 个因子的相关性进行研究(表 2),筛选出影响显热通量的主要因子。按照特征值>1,累计贡献率>85%选取主成分特征向量,各典型日约 2~4 个。结果发现,土壤温度在每个典型日中第一主成分中的特征向量均比较大,土壤温度在影响该地区显热通量值的诸多因子中始终处于主导地位。夏至日第一主成分中 2 cm 与 15 cm 深处土壤含水量的特征向量也较大,同样也是主导因子,表明土壤含水量对显热通量值的变化规律有非常大的影响。春分日除土壤含水量外,空气温度的第一主成分特征向量也较大,表明在暖温带大陆性气候区,随着季节温度的变化,显热通量值也将呈现出一定的规律性。风速、风向、蒸发散与太阳辐射等其他因子的特征向量的最大值出现在第二、三主成分中,表明它们在影响显热通量值变化的因子中居于次要地位。

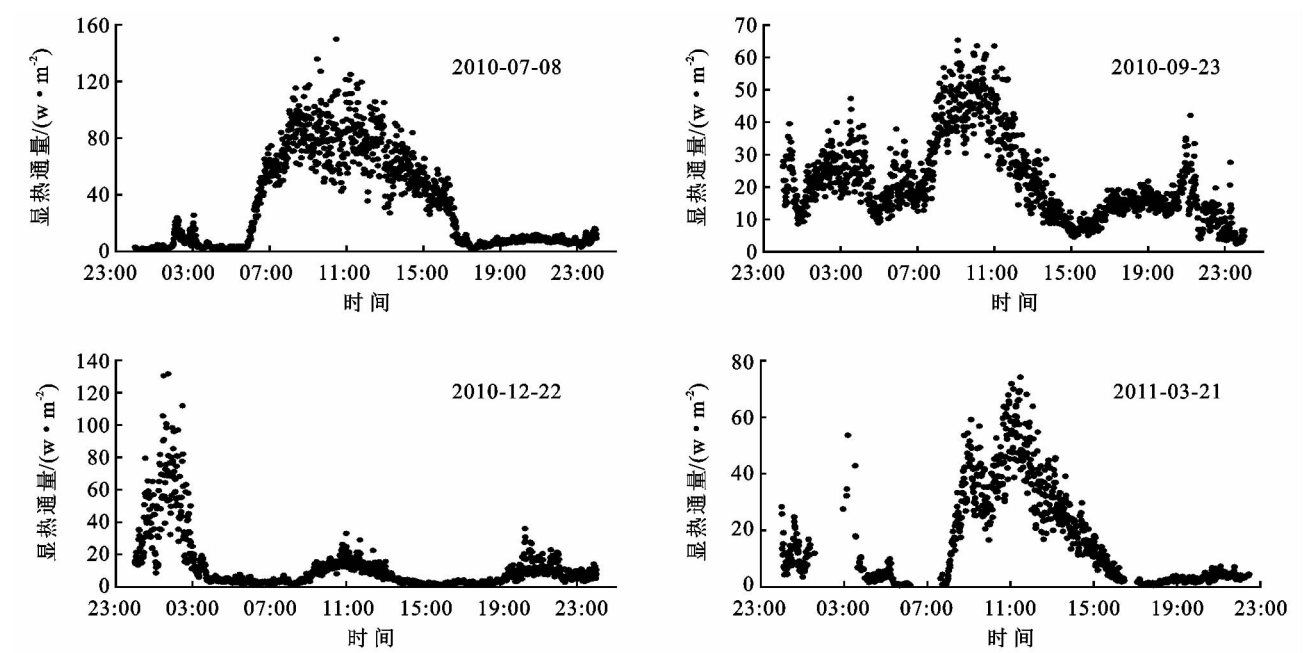


图 1 典型晴天显热通量变化规律

表 2 主成分(PCA)的因子负荷量、特征根与贡献率

影响因子	2010-07-08		2010-09-23				2010-12-22			2011-03-21			
	1.00	2.00	1.00	2.00	3.00	4.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	4.00
ST2	0.38	0.88	0.50	0.58	-0.22	-0.51	0.88	-0.10	-0.05	0.91	-0.21	0.18	0.02
ST5	0.66	0.72	0.77	0.44	-0.19	-0.38	0.96	-0.02	-0.10	0.94	0.25	-0.07	0.03
ST10	0.87	0.48	0.94	0.18	-0.19	-0.19	0.97	0.09	-0.07	0.66	0.69	-0.30	0.01
ST15	0.97	0.22	0.97	-0.08	-0.19	-0.02	0.94	0.17	-0.06	0.12	0.92	-0.35	0.02
ST20	0.99	0.03	0.92	-0.24	-0.20	0.12	0.92	0.17	-0.02	-0.36	0.89	-0.24	-0.03
SMT2	-0.96	-0.18	-0.80	-0.02	0.59	0.09	0.93	0.05	0.02	-0.08	-0.04	0.97	-0.05
SMT5	-0.89	-0.07	-0.76	-0.03	0.63	0.10	0.93	0.11	0.03	0.39	-0.22	0.87	-0.02
SMT10	0.75	0.54	-0.60	0.06	0.79	0.00	0.95	0.05	-0.04	0.58	0.79	0.05	0.02
SMT15	0.98	-0.03	-0.11	-0.11	0.98	0.10	0.97	0.08	-0.11	-0.32	0.90	0.17	0.02
SMT20	0.86	-0.40	-0.35	-0.29	0.82	0.30	0.93	-0.19	-0.10	-0.63	0.63	0.42	-0.04
AT	0.38	0.89	0.47	0.57	-0.21	-0.60	0.13	0.64	0.59	0.92	0.00	-0.11	0.26
ARH	-0.50	-0.83	-0.55	-0.48	0.06	0.62	-0.56	-0.70	-0.02	-0.61	0.53	0.46	-0.33
WS	0.20	0.70	0.02	0.13	0.11	0.83	-0.31	0.77	0.48	0.03	-0.18	0.07	0.93
WD	0.09	-0.74	0.10	-0.60	0.09	0.61	0.01	-0.95	0.16	0.12	0.30	-0.18	0.58
ET	-0.16	0.86	0.06	0.96	-0.06	-0.05	-0.72	0.31	0.32	0.76	-0.19	0.07	0.52
Rn	-0.31	0.80	-0.16	0.93	-0.06	0.04	-0.12	-0.01	0.94	0.81	-0.13	0.25	-0.08
特征根	7.82	5.96	5.81	3.44	3.28	2.38	9.75	2.61	1.63	5.75	4.57	2.53	1.66
方差贡献率/%	48.88	37.28	36.32	21.51	20.49	14.87	60.94	16.29	10.17	35.90	28.54	15.83	10.39
累计贡献率/%	48.88	86.16	36.32	57.82	78.31	93.20	60.94	77.23	87.40	35.90	64.44	80.27	90.66

注:ST 为土壤温度,SMT 为土壤含水量,AT 为空气温度,ARH 为空气相对含水量,WS 为风速,WD 为风向,ET 为下垫面蒸散,Rn 为太阳净辐射。

2.3 环境控制因子与显热通量的相关性分析

在 16 个环境控制因子中,选择前 3 个主成分中占主要地位的 11 个因子作为主要因子变量,进一步分析它们与显热输送的关联程度(表 3)。从表 3 可知,4 个典型晴天显热通量与各因子的关联程度不同,土壤含水量、土壤温度与显热通量值呈极显著相关,4

个典型晴天 5 cm 处土壤温度多与显热通量值成正相关关系,土壤含水量多与显热通量值呈负相关关系,即土壤水分充足时,植物蒸腾作用明显,蒸腾吸热过程中减少了向大气中输送的热量,因而造成显热通量值的降低,而土壤温度多与土壤含水量成负反馈关系^[24],说明土壤温度与显热通量值应呈正相关关系。

表 3 不同环境控制因子与显热通量的相关性

时间	影响因子	ST5	ST10	ST15	ST20	SMT2	SMT15	AT	ET	WS	WD	Rn
2010-07-08	ST10	0.9391**										
	ST15	0.7942**	0.9526**									
	ST20	0.6546**	0.8680**	0.9771**								
	SMT2	-0.7371**	-0.9143**	-0.9829**	-0.9777**							
	SMT15	0.6139**	0.8387**	0.9516**	0.9736**	-0.9306**						
	AT	0.9148**	0.7655**	0.5606**	0.3908	-0.4984**	0.3275					
	ET	0.4937**	0.2827	0.0547	-0.1077	-0.0328	-0.1212	0.6237				
	WS	0.5801**	0.4780**	0.3339	0.2213	-0.3306	0.1581	0.6408	0.5290**			
	WD	-0.4084**	-0.2363	-0.0705	0.0444	0.0726	0.1643	-0.6768	-0.4602**	-0.5637**		
	Rn	0.3503	0.1221	-0.1042	-0.2567	0.1191	-0.2680	0.5119	0.9821**	0.4132**	-0.4335**	
H	0.0520	-0.2442	-0.4756**	-0.6029**	0.4820**	-0.6917**	0.4031**	0.5508**	0.3855	-0.7187**	0.6009**	
时间	影响因子	ST5	ST10	ST15	ST20	SMT2	SMT15	AT	ET	WS	WD	Rn
2010-09-23	ST10	0.4638**										
	ST15	0.2450	0.9179**									
	ST20	0.0152	0.7391**	0.9440**								
	SMT2	-0.1425	0.5607**	0.8381**	0.9704**							
	SMT15	-0.1148	-0.7626**	-0.8881**	-0.8973**	-0.8460**						
	AT	-0.1671	-0.3551	-0.3229	-0.2855	-0.2487	0.6707**					
	ET	0.5963**	0.8931**	0.6976**	0.4521**	0.2388	-0.5629**	-0.3925				
	WS	-0.0473	-0.2263	-0.1445	-0.0641	0.0039	0.1387	0.1492	-0.3762			
	WD	-0.5322**	-0.4215**	-0.1412	0.1016	0.2710	0.0417	0.2088	-0.6768**	0.2788		
	Rn	0.9571**	0.2492	0.0197	-0.1898	-0.3150	0.0694	-0.1187	0.3968	-0.0325	-0.4570**	
H	0.2376	-0.3231	-0.5898**	-0.7156**	-0.7460**	0.5381**	0.0085	-0.0061	-0.0707	-0.5061**	0.3491	
时间	影响因子	ST5	ST10	ST15	ST20	SMT2	SMT15	AT	ET	WS	WD	Rn
2010-12-14	ST10	0.9475**										
	ST15	0.8713**	0.9782**									
	ST20	0.8179**	0.9475**	0.9901**								
	SMT2	0.8335**	0.8825**	0.9002**	0.9183**							
	SMT15	0.9260**	0.9639**	0.9517**	0.9270**	0.9147**						
	AT	0.0375	0.1061	0.1665	0.1877	0.2130	0.1240					
	ET	-0.7603**	-0.6376**	-0.5340**	-0.4966**	-0.6394**	-0.6601**	0.2375				
	WS	-0.3554	-0.2491	-0.1675	-0.1534	-0.2463	-0.2885	0.6444**	0.6163**			
	WD	-0.0048	-0.0922	-0.1504	-0.1308	0.0002	-0.0676	-0.4146**	-0.2525	-0.6491**		
	Rn	-0.1673	-0.1800	-0.1886	-0.1738	-0.1414	-0.2335	0.4155**	0.3300	0.4838**	0.0823	
H	-0.1817	-0.0390	0.0982	0.2136	0.2416	-0.0004	0.1894	0.2124	0.2327	-0.0231	0.0561	
时间	影响因子	ST5	ST10	ST15	ST20	SMT2	SMT15	AT	ET	WS	WD	Rn
2011-03-21	ST10	0.8219**										
	ST15	0.3538	0.8149**									
	ST20	-0.1168	0.4402**	0.8730**								
	SMT2	-0.1542	-0.3742	-0.3844	-0.2306							
	SMT15	-0.1160	0.3494	0.7416**	0.8801**	0.1414						
	AT	0.8792**	0.6339**	0.1532	-0.3077	-0.1782	-0.2764					
	ET	0.6308**	0.3267	-0.0933	-0.4530**	-0.0332	-0.3479	0.8037**				
	WS	0.0078	-0.1105	-0.1530	-0.2037	0.0060	-0.1250	0.2971	0.5660**			
	WD	0.2463	0.3521	0.3261	0.2059	-0.1807	0.1200	0.1813	0.1856	0.2624		
	Rn	0.6398**	0.3308	-0.1147	-0.4504**	0.1448	-0.2985	0.6501**	0.7571**	-0.0531	-0.0113	
H	0.2411	-0.1938	-0.5542**	-0.6450**	0.5307**	-0.4549**	0.1694	0.1494	-0.2860	-0.3823	0.4606**	

注:(1) ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关;(2) ST 为土壤温度,SMT 为土壤含水量,AT 为空气温度,ET 为下垫面蒸发散,WS 为风速,WD 为风向,Rn 为太阳有效辐射,H 为显热通量。

春分日与夏至日太阳辐射与显热输送表现出显著的正相关关系,秋分日与冬至日两者关系不显著,这是由于从春季到夏季太阳辐射值逐渐升高,夏季太阳辐射值最大,从秋季到冬季太阳辐射逐渐减小,冬季太阳辐射值最低,而显热通量变化规律与太阳辐射变化规律基本一致,故而显热通量与太阳辐射之间呈显著正相关。另外,风向与风速与显热输送也表现出了显著的相关性,这与暖温带大陆性气候特征风多干燥这一特点密不可分,观测站海拔高度 100~1 150 m,巨大的高度差也是造成风向与风速对显热通量规律产生不可避免的影响的重要原因。

3 结 论

3.1 显热通量变化规律

LAS 鹭峰站点日变化规律与平坦(或均匀)下垫面基本一致,即显热通量与天气条件密切相关,具有明显的季节性变化规律^[3,24-25]。4 个典型晴天均有峰值出现,或单峰或双峰,从年初到年末显热通量峰值从中午逐渐向上午偏移;秋分日显热通量值波动最为明显,是湍流最活跃的时期,冬至日显热通量值波动较为平缓;夏至日显热通量值最大,处于波峰期,冬至日显热通量值最小,处于波谷期,春分与秋分日峰值位于两者之间,从波谷期开始热通量值逐渐增加;LAS 鹭峰站点显热通量数值均偏小,其原因主要在于研究区地形起伏大,所测数据不能完全代表所在区域的实际情况。目前该领域的研究多基于平坦下垫面的实验布设^[15,26],深入分析地形起伏较大区域大孔径闪烁仪测定显热通量的空间代表性的应用是未来研究的发展趋势。

3.2 LAS 鹭峰站点显热通量的主要影响因子及相互关系

影响 LAS 鹭峰站点显热通量变化的控制因子很多,主成分分析表明,土壤温度、土壤含水量、空气温度、下垫面蒸散发、风速、风向以及太阳有效辐射是影响显热通量值的主导因子,除此之外,不同典型晴天的主导因子不同,如春分日:土壤含水量、空气温度;夏至日:2 cm 与 15 cm 深处土壤含水量。土壤温度在每个典型日中特征向量均较大,处于主导地位,风速、风向、蒸散发与太阳辐射等其他因子的特征向量的最大值出现在第二、三主成分中,表明它们在影响显热通量值变化的因子中居于次要地位。

相关性分析表明,土壤含水量、土壤温度与显热通量值呈极显著相关,其余控制因子与典型晴天的关联程度不同,如春分日与夏至日太阳辐射与显热输送表现出显著正相关关系,秋分日与冬至日两者关系不

显著。受下垫面植被组成复杂,地形起伏大等因素的影响,风向与风速与显热输送也表现出了显著的相关性,说明风向与风速也会对显热通量变化规律产生不可避免的影响。

平原和低山丘陵区非均一下垫面条件下利用大孔径闪烁仪测量显热通量已有不少研究,但在地形起伏大、下垫面复杂的地区研究较少。需要说明的是通量空间代表性的研究以及利用大孔径闪烁仪测量通量的能量平衡研究在山区还急需深入,只有基于 LAS 的空间代表性得到了充分的肯定之后,LAS 广泛应用于山区通量值的测定才具有可靠的理论基础。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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):1139-1147.
- [3] 朱治林,孙晓敏,贾媛媛,等. 基于大孔径闪烁仪(LAS)测定农田显热通量的不确定性分析[J]. 地球科学进展,2010,25(11):1199-1207.
- [4] 褚英敏,袁再健,刘畅,等. SiB2 模型在黄灌区的应用探讨[J]. 水土保持研究,2011,18(2):159-163.
- [5] 卢俐,刘绍民,孙敏章,等. 大孔径闪烁仪研究区域地表通量的进展[J]. 地球科学进展,2005(9):932-938.
- [6] 马迪,吕世华,陈晋北,等. 大孔径闪烁仪测量戈壁地区感热通量[J]. 高原气象,2010(1):56-62.
- [7] Nieveen J P, Green A E, Kohsiek W. Using a large-aperture scintillometer to measure absorption and refractive index fluctuations [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1998,87(1):101-116.
- [8] Beyrich F, De Bruin H A R, Meijninger W M L, et al. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface [J]. Boundary-Layer Meteorology,2002,105(1):85-97.
- [9] Hoedjes J C B, Zuurbier R M, Watts C J. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area, partly affected by regional advection[J]. Boundary-Layer Meteorology,2002,105(1):99-117.
- [10] Kohsiek W, Meijninger W M L, Moene A F, et al. An extra-large aperture scintillometer for long range applications[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105: 119-127.
- [11] 贾贞贞,刘绍民,毛德发,等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究[J]. 地球科学进展,2010,25(11):1248-1260.

306.

[6] 高峰,李新,Armstrong R L,等. 被动微波遥感在青藏高原积雪业务监测中的初步应用[J]. 遥感技术与应用, 2003,18(6):360-363.

[7] 麻旭辉,刘志辉,肖继东. NOAA/AVHRR 与 EOS/MODIS 的积雪监测模式对比[J]. 水土保持研究, 2008,15(3):220-225.

[8] 刘艳,张璞. 基于遥感的径流丰枯与高山区积雪关系分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(3):44-48.

[9] 刘艳,李杨,张璞. 玛纳斯河流域融雪径流与积雪—气象因子分析[J]. 水土保持研究, 2010,17(2):145-149.

[10] 刘明辉,王飞,李锐,等. 土石山林区和黄土塬农区不同覆盖类型土壤水分差异性分析[J]. 水土保持研究, 2011,18(3):187-190.

[11] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 smmr derived global snow cover parameters[J]. Annals of Glaciology, 1987,9:39-44.

[12] 曹梅盛,李培基. 中国西部积雪微波遥感监测[J]. 山地研究, 1994,12(4):230-234.

[13] Foster J L, Chang A T C, Hall D K. Comparison of snow mass estimates from a prototype passive microwave snow algorithm, a revised algorithm and a snow depth climatology [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,62(2):132-142.

[14] 崔彩霞,杨青,王胜利. 1960—2003 年新疆山区与平原积雪长期变化的对比分析[J]. 冰川冻土, 2005,27(4):486-490.

[15] 杨军,董超华等. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[16] Hall D K, Strurm M. Passive microwave remote and in situ measurements of arctic and subarctic snow cover in Alaska[J]. Remote Sensing Environment, 1991,38(3):161-172.

[17] Thomas H P, Jeff Dozier, Dar A R, et al. Retrieval of Sub-pixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 2003,85:64-77.

[18] Neale C, McFarland M L, Chang K. Land surface type classification using microwave brightness temperatures from the special sensor microwave/imager[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1990,28(5):829-837.

[19] 马虹,胡汝骥. 积雪对冻土热状况的影响[J]. 干旱区地理, 1995,18(4):23-27.

~~~~~

(上接第 165 页)

[12] 刘雅妮,辛晓洲,柳钦火,等. 基于多尺度遥感数据估算地表通量的方法及其验证分析[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1261-1272.

[13] 李远,孙睿,刘绍民,等. 大孔径闪烁仪观测数据在陆面模式验证中的应用初探[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1237-1247.

[14] 卢俐,刘绍民,徐自为,等. 大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1273-1282.

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

[16] 白洁,刘绍民,丁晓萍. 海河流域不同下垫面上大孔径闪烁仪观测显热通量的时空特征分析[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1187-1198.

[17] 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(7):714-723.

[18] 施生锦,黄彬香,刘绍民,等. 大尺度水热通量观测系统的研制[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1128-1138.

[19] Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. Saturation of optical scintillation by strong turbulence[J]. Journal of Optical Society of America, 1974,64:148-154.

[20] Green A E, McAneney K J, Astill M S. Surface-layer scintillation measurement of day time sensible and momentum fluxes[J]. Boundary Layer Meteorology, 1994, 68(4):357-373.

[21] Wang T, Ochs G R, Clifford S F, et al. A saturation-resistant optical scintillometer to measure  $C_n^2$  [J]. Journal of Optical Society of America, 1978, 68(3):334-338.

[22] 马志林,陈丽华,韩鹏,等. 鹫峰国家森林公园风景林健康评价研究[J]. 水土保持研究, 2010,17(6):207-211.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 王维真,徐自为,李新,等. 大孔径闪烁仪在黑河流域的应用分析研究[J]. 地球科学进展, 2010,25(11):1208-1215.

[26] 胡丽琴,吴荣璋,方宗义. 大口径闪烁仪及其在地表能量平衡监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2003,14(2):197-205.