

文章编号:1001-8166(2009)07-0714-10

# 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析\*

王维真<sup>1</sup>,徐自为<sup>2</sup>,刘绍民<sup>2</sup>,李新<sup>1</sup>,马明国<sup>1</sup>,王介民<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000;

2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室,地理学与遥感科学学院,北京 100875)

**摘要:**“黑河流域遥感—地面观测同步试验”在黑河上中游地区不同下垫面上建立了多个自动气象站和涡动相关仪及大孔径闪烁仪通量观测站。选取草地、森林及农田3种下垫面的观测资料,分析了水、热和CO<sub>2</sub>通量特征。结果表明:黑河流域内不同下垫面能量收支各分量(净辐射、感热、潜热和土壤热通量等)有明显的日变化特征;各通量观测站观测结果如季节变化趋势等差异明显,反映了不同下垫面地气交换特征的不同。黑河上游阿柔冻融观测站和中游临泽草地站两套大孔径闪烁仪(LAS)的观测与涡动相关仪有关结果有较好的对应关系。结合浅层土壤热储存量的计算等分析了地表能量平衡的闭合情况。LAS观测的感热通量一般大于涡动相关仪的测量值;两者的差异主要由下垫面的非均一性、通量贡献源区大小不同以及影响大气湍流通量观测的涡旋尺度不同等原因引起。

**关键词:**黑河综合试验;不同下垫面;水热通量;涡动相关;LAS

**中图分类号:**P422.4;P334 **文献标志码:**A

## 1 引言

地气间动量、热量、水分和CO<sub>2</sub>等的交换对天气气候变化、水文及生态过程等都起着十分重要的作用。对地气相互作用各过程特别是土壤和植被与大气间水热通量输送的定量了解,不仅是大气动力热力过程分析的基础,也是农业生态和水资源研究等的核心内容。从20世纪80年代中开始,特别是近10多年以来,不同生态系统的水、热和CO<sub>2</sub>通量的长期观测研究成为国内外广泛关注的热点问题<sup>[1]</sup>。

黑河流域是中国西部各内陆流域中最有代表性和地区性特色的流域之一;从其上游到中下游,寒区和旱区相伴而生,具有独特的以水为纽带的“冰雪/冻土—森林—河流—湖泊—绿洲—荒漠”多元

自然景观;顺次分布的高山冰雪带、草原森林带、平原绿洲带和戈壁荒漠带等自然地理单元,是在流域尺度上开展寒区和干旱区水文与生态等陆面过程研究的理想场所。在开展卫星和飞机遥感的同时,在不同下垫面上建立较先进的地表参数(包括能量、水分和CO<sub>2</sub>通量)观测站,是“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”项目的重要方面<sup>[2]</sup>。它不仅是在黑河流域多年地面观测实验基础上一次更为综合深入的地气相互作用过程研究,也是发展和验证遥感算法,并将不同下垫面研究结果向流域尺度扩展所必不可少的。

地表水热通量的观测计算包括波文比能量平衡方法、空气动力学方法或梯度法以及涡动相关(涡动协方差)方法等。其中涡动相关方法通过计算风速脉动与某标量脉动的协方差,直接得到一定时段

\* 收稿日期:2009-02-18;修回日期:2009-06-06.

\* 基金项目:中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09-03);国家自然科学基金项目“复杂条件下湍流通量的观测与分析研究”(编号:40875006);国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714401)资助。

作者简介:王维真(1967-),男,山西万荣人,副研究员,博士,主要从事土壤水文学和气象环境水文学研究. E-mail: weizhen@lzb.ac.cn

的通量,方法简单且理论基础坚实。随着测量(包括超声风温仪和快速气体分析仪等)和计算技术的迅猛发展,此方法已经在近年有关野外试验台站得到相当普遍的使用,并使长期连续自动的地表通量观测成为可能。但获得较好的通量观测结果却与许多因素有关,包括一些复杂条件(如地形起伏、斑块植被、不利气象条件)的影响和数据处理过程中一些修正方法的应用等。近10~15年来困扰涡动相关通量观测的“能量平衡闭合问题”和观测结果所关心下垫面的代表性等问题,近年虽已有较清楚的认识,但在实际的观测与分析过程中仍需要充分注意<sup>[3-5]</sup>。

大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)观测地表感热通量等近年在不同下垫面的通量观测中已有较多的应用<sup>[6,7]</sup>。单台大孔径闪烁仪可以测量200 m至5 km(甚至10 km)尺度上的平均感热通量,不仅对时间,也对空间作了平均。其测量尺度与卫星遥感的像元尺度及大气模式的网格尺度匹配较好。这一优势使其在短短十几年里迅速发展,并具有广阔的应用前景。

本文采用涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测数据对黑河流域3种典型下垫面(森林、草地和农田)的水热通量特征进行了分析研究,内容包括:①站点仪器和观测资料处理方法;②不同下垫面通量主要是感热和水汽通量的日变化和季节变化特征,包括涡动相关仪和大孔径闪烁仪通量观测的比较和地表能量闭合问题的检验;③CO<sub>2</sub>通量变化分析。

## 2 观测站点、观测仪器及数据处理

### 2.1 观测站点及仪器

研究选取了黑河流域4个涡动相关仪观测站点,包括森林、草地和农田3种下垫面类型。森林下垫面为大野口关滩森林站(简称关滩站),草地下垫面为阿柔冻融观测站(简称阿柔站)和临泽草地站,农田下垫面为盈科灌区绿洲站(简称盈科站)。黑河综合观测试验区及各站点分布如图1所示。阿柔站位于黑河上游,盈科、临泽和关滩站位于黑河中游。各站点气候差异较大,对不同下垫面类型各有较好的代表性。各站都有自动气象站和涡动相关通量观测系统;涡动相关仪的采样频率为10 Hz,取平均时段为30 min。在阿柔站和临泽草地站,还有LAS的观测;LAS的有效高度和发射器与接收器之间的距离,在阿柔站分别为9.5 m和2 390 m,在临泽草地站分别为9.2 m和1 550 m。各站位置和主

要通量观测仪器及观测时段如表1所示。自动气象站观测仪器的较详细说明见表2。

### 2.2 观测数据的处理

为了确保观测数据的准确性,对涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测数据进行了严格的质量控制。

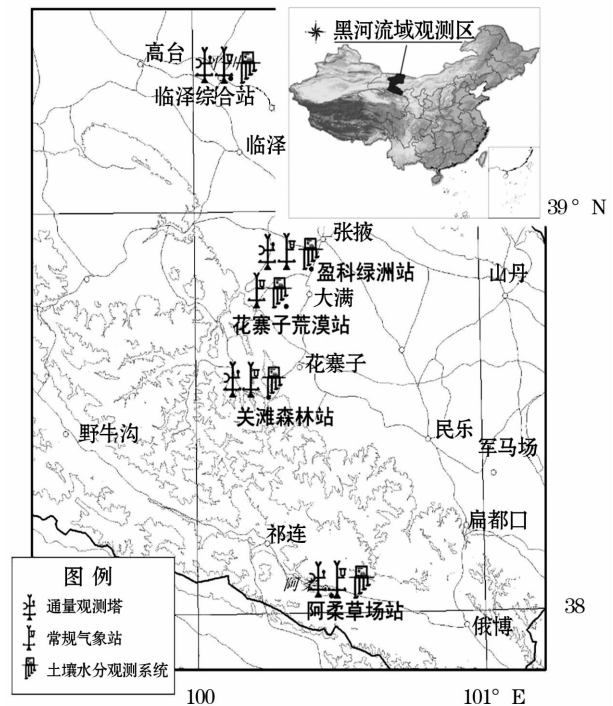


图1 观测站点位置

Fig. 1 Location of observation sites

#### 2.2.1 涡动相关仪

对涡动相关通量观测资料,从采集的10 Hz原始湍流数据出发,根据全球通量网(FluxNet)有关推荐意见<sup>[8]</sup>,利用英国爱丁堡大学EdiRe软件(<http://www.geos.ed.ac.uk/research/micromet/EdiRe>),重新编写处理程序,进行了仔细的再处理。处理过程包括了野点剔除,延迟时间校正,倾斜校正(平面拟合法坐标旋转),感热通量的超声虚温校正(浮力通量校正),水汽和CO<sub>2</sub>通量的空气密度脉动影响校正(即WPL修正)<sup>[9]</sup>等最主要的校正方法。

对观测数据的质量控制主要参照欧洲通量网的推荐方法,主要包括对原始湍流资料的质量检查、观测时段的大气平稳性检验和大气湍流发展性检验等部分<sup>[3]</sup>。首先对湍流资料进行了严格的筛选,标准为:①剔除传感器状态异常数据;②剔除降水时次及该时次前后1 h数据;③剔除原始30 min记录不完整(缺测大于3%)的时次。对大气较稳定情况下如夜间观测数据进行湍流总体特征即湍流发展性检

表1 各站点位置、下垫面及通量观测概况  
Table 1 Description of EC and LAS observation at each site

站名	下垫面	经纬度	海拔高度(m)	通量观测时间段及仪器型号	
				涡动相关系统(EC)	大孔径闪烁仪(LAS)
阿柔冻融观测站(AR)	高山草原	100°27'E,38°03'N	3 033	2008.06.10 ~ 10.31 Li7500 & CSAT3	2008.03.11 ~ 10.31 BLS450, Scintec
大野口关滩森林站(GT)	森林(青海云杉)	100°15'E,38°32'N	2 835	2008.01.01 ~ 10.31 Li7500 & CSAT3	
盈科灌区绿洲站(YK)	农田(玉米,小麦)	100°25'E,38°51'N	1 519	2008.01.01 ~ 10.31 Li7500 & CSAT3	
临泽草地站(LZ)	湿地,盐碱地	100°04'E,39°15'N	1 394	2008.05.18 ~ 05.25 Li7500 & KH20	2008.05.19 ~ 08.31 Kipp & Zonen

表2 各自动气象站点仪器及观测高度(深度)配置  
Table 2 Observed terms and instrument types of automatic weather station (AWS) at each site

观测项目	阿柔冻融观测站		大野口关滩森林站		盈科灌区绿洲站		临泽草地站	
	仪器型号	架高/埋深(m)	仪器型号	架高/埋深(m)	仪器型号	架高/埋深(m)	仪器型号	架高/埋深(m)
空气温湿度	HMP45C	2, 10	HMP45C	2, 10, 24	HMP45C	3, 10	HMP45C	1.2, 4.2, 10.6
风速	014A	2, 10	014A/034B	2, 10, 24	010C-1	3, 10	Vaisala WS425	1.2, 4.2, 10.6
风向	034B	10	034B	24	020C-1	10	Vaisala WS425	1.2, 4.2, 10.6
总辐射,反射辐射	PSP	1.5	CM3	1.68, 19.75	CM3	4	CM3	2.5
向上/向下长波辐射	PIR	1.5	CG3	1.68, 19.75	CG3	4	CG3	2.5
土壤热通量	HFT3	0.05, 0.15	HFP01	0.05, 0.15	HFP01	0.05, 0.15	--	--
土壤温度	107	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	107	0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2	109	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	107	0.02, 0.05, 0.1
土壤湿度	CS616	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	CS616	0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2	CS616	0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	--	--
降水	TE525	2.82	52202	20	52202	4	52202	1
气压	CS105	0.5	CS105	0.5	CS100	0.5	CS100	1.5

验,剔除湍流混合较弱时次的的数据;简单情况下,采用临界摩擦风速(如0.1 m/s)作为大气湍流混合强弱的判断标准(为保证观测数据的连续性,在分析通量日变化时并未剔除)。

在长时间连续观测中,由于受不利气象条件及电源不足等影响,涡动相关仪观测数据会有不同程度的缺失。本文在季节变化分析时对一些短时的缺失数据进行了填补,所用方法为:如果通量数据缺失期间有气象要素观测,采用查表法(Look Up Table, LUT);如果通量数据缺失期间气象数据同样缺失,则采用平均昼夜变化法(Mean Diurnal Variation, MDV)<sup>[10]</sup>。

### 2.2.2 大孔径闪烁仪

LAS测量的原始数据为空气折射指数结构参数( $C_n^2$ ),需经过一系列处理过程得到感热通量<sup>[6]</sup>。为确保计算结果的准确性,增加了以下处理过程:

(1) 数据的筛选:包括剔除降雨时次的的数据和剔除过饱和数据。当闪烁强度超过一定上限后闪烁仪测量理论不再满足。参Ochs等<sup>[11]</sup>给出的饱和上

限 $C_n^2 < 0.193L^{-8/3} \lambda^{2/6} D^{5/3}$ (其中 $L, \lambda, D$ 分别表示光径长度,光学波长以及孔径直径),计算得到阿柔、临泽站LAS的饱和上限分别为 $7.25E-14$ 和 $2.4E-13$ 。

(2) 大气稳定度的判断:大孔径闪烁仪仅能观测到大气湍流的强度,并不能判断通量的符号,因此,需要对白天不稳定状态到夜间稳定情况下感热输送方向进行判断。本文将净辐射大于 $10 \text{ W/m}^2$ 视为不稳定状态<sup>[12]</sup>。

(3) 稳定度函数的选择:根据对目前国内外使用的5种不同普适函数表达式进行比较<sup>[13]</sup>,除了De Bruin函数外,其他3个函数与仪器说明书中所推荐使用的Andreas函数计算值都非常接近。本文选取Andreas<sup>[14]</sup>的函数作为稳定度函数进行计算。

### 2.2.3 土壤热通量

地表土壤热通量是能量平衡分析的重要分量之一。土壤热流板一般埋装在地表2~3 cm以下,需要进行仔细订正,以得到地表的土壤热通量值。本文采用阳坤等<sup>[15]</sup>方法进行处理。该方法首先求解一维热扩散方程得到土壤温度的基本廓线,然后校

正所求温度廓线与观测值的偏差,最后积分温度廓线得到土壤各层的热通量。

### 3 结果分析

#### 3.1 各站典型晴天能量收支分量的日变化特征

对3种不同下垫面类型的盈科站(YK)、阿柔站(AR)和关滩站(GT),在非生长季(冬季)和作物生长季(夏季)各选择一个典型晴天(非生长季选2008年1月6日,生长季选同年7月1日。因阿柔站缺1~2月数据,非生长季选开春前的3月16日),分析了净辐射( $R_n$ )、感热( $H$ )、潜热( $LE$ )和土壤热通量( $G$ )的日变化特征,如图2所示。

不论作物生长季或非生长季,几种下垫面的能量收支各项均有明显的日变化过程,且一般在地方时正午前后达到最大值。对非生长季(冬季),感热通量是近地面可利用能量消耗的主要形式,各站感热占净辐射的比例分别为:YK,57%;AR,55%;GT,77%,潜热通量普遍较小。作物生长季(夏季),由

于蒸散量大,潜热通量明显增加,在盈科、阿柔和关滩各站分别占到净辐射的76%、72%和31%,盈科站的变化最大。由于该站地处绿洲中心,夏季晴天“绿洲效应”<sup>[16]</sup>明显:①潜热通量大,日蒸散量超过5 mm;②由于周围干热沙漠的影响,绿洲内的感热通量小,且在白天中午至下午这一较长时段变为负值,即热量由上向下传输,近地层出现逆温。这和黑河试验区多次观测试验的结果相一致<sup>[17,18]</sup>。阿柔站海拔较高,夏季的蒸散量明显增加,感热通量占净辐射的比例则减小为约10%。关滩站夏季的潜热通量虽也明显增大,感热通量却仍占净辐射的49%,是能量消耗的主要形式。

各站净辐射的比较,总的说差别不大。但冬季绿洲为裸地,盈科站的净辐射比其它两站要小(阿柔站的明显大,主要由日期不同引起)。夏季绿洲站的净辐射较大,也符合一般规律。土壤热通量在各站能量收支各分量中所占的比例一般低于10%

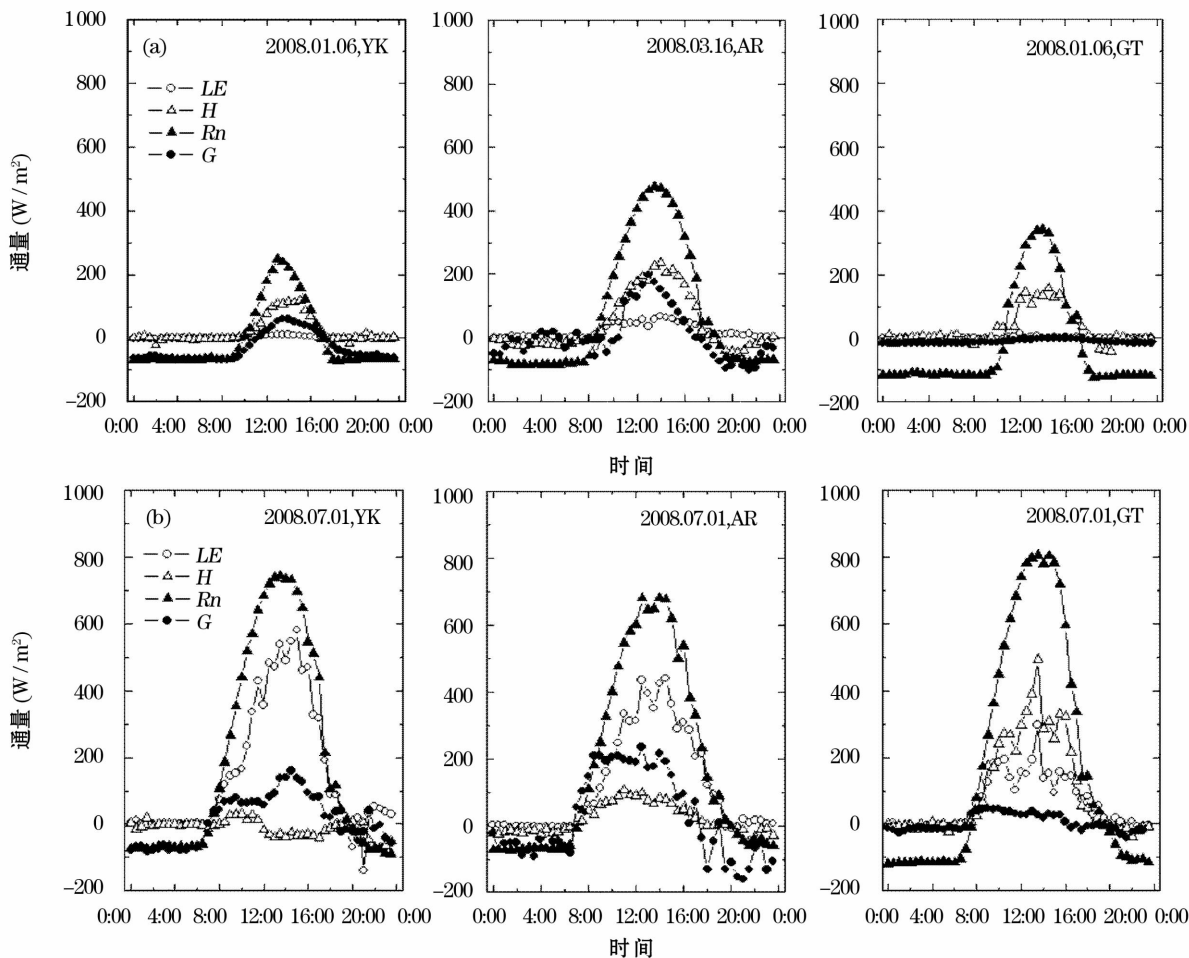


图2 不同下垫面非生长季和生长季典型晴天的地表能量收支各分量的日变化特征比较  
(YK为盈科站,AR为阿柔站,GT为关滩站,横坐标时间为北京时间)

Fig. 2 Diurnal variation of energy balance component over different surfaces

(在阿柔站所占比例略大;冬季盈科站为裸地,土壤热通量也相对大些),主要是植被冠层的影响。关滩站由于位于青海云杉林内,其冠层高度达18 m以上,测量到的土壤热通量小于净辐射的0.1%,已没有多少意义;能量收支分析时必须考虑冠层的热储存影响。盈科站7月初为春小麦与玉米套种田,春小麦高度也接近1 m,冠层的热量收支也不可忽略。

### 3.2 水热通量的季节变化特征

根据盈科、阿柔和关滩3站从2008年1月(阿柔为3月)至10月的观测,以涡动相关仪通量资料的再处理结果为主,初步分析了试验区潜热(蒸发蒸腾量)和感热的季节变化特征。为使特征更清楚,图3和图4所示通量数据为每天10:00-16:00观测数据的平均。如上所述,分析时对短时段缺失数据进行了插补;不处理因电源等问题引起的数天以上的数据缺失时段。下同。

图3为盈科、阿柔和关滩3站2008年1~10月的感热通量变化。由于各站都处在植被覆盖区,感热通量总体都较小。关滩站感热的年变化符合一般趋势,其量值也大于其它两站。由于上述“绿洲效应”或近似原因,盈科站和阿柔站的感热通量在夏季反而比春秋两季偏低。

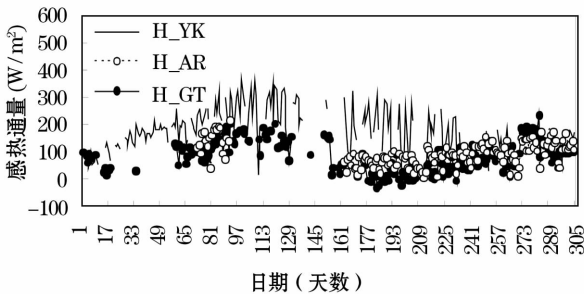


图3 盈科、阿柔和关滩3站2008年1~10月的感热通量变化

Fig. 3 Seasonal variation of  $H$  at different sites

各站潜热通量(蒸散量)的季节变化如图4所示,图5则给出3站2008年各月累计蒸散量(mm)的比较。与上节分析一致,蒸散量季节变化明显,各站的差异也较大。1、2月各站点潜热通量均很小,3月份潜热通量逐渐增加,随着气温的进一步升高以及作物的生长,潜热通量增加明显。盈科、阿柔站的潜热通量在7月初达到最大值,关滩站的最大值则在6月中旬,之后又逐渐减小。作物生长季,盈科站的潜热通量明显大于其它2个站点,关滩站的潜热通量则相对较小。盈科和关滩站1~10月累计蒸散

量分别为719.15 mm和371.25 mm,阿柔站6~10月累计蒸散量为334.32 mm。其中作物生长季(5~9月)盈科蒸散量为568.37 mm,占1~10月蒸散总量的79%;关滩站为301.16 mm,占1~10月蒸散总量的81%。

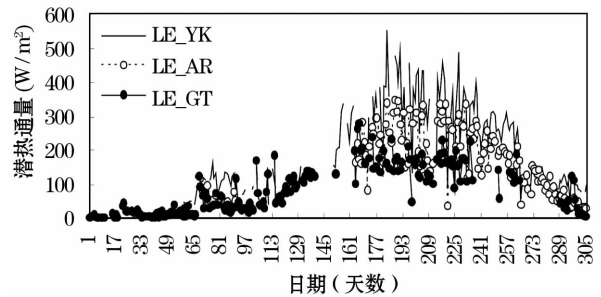


图4 与图3类似,但为各站潜热通量(LE)的季节变化  
Fig. 4 Seasonal variation of  $LE$  at different sites

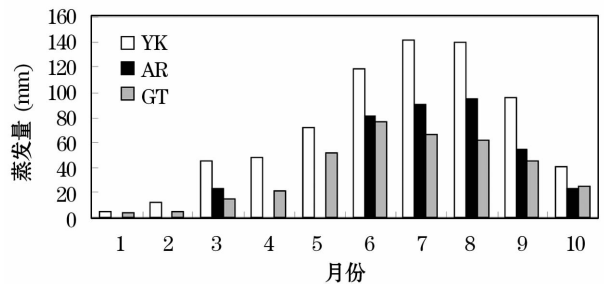


图5 3站2008年各月累计蒸散量的比较

Fig. 5 Monthly variation of  $ET$  over different surfaces

### 3.3 大孔径闪烁仪(LAS)的通量观测结果及其与涡动相关仪的比较

如第一节所述,黑河试验期阿柔站和临泽草地站各装有一台LAS。阿柔站的LAS从2008年3月11日起即连续工作,临泽草地站的LAS则只有夏季3个多月的资料。

两站大孔径闪烁仪观测得到的感热通量与涡动相关仪的基本一致。图6给出临泽草地站一个晴天(5月20日)和一个阴天(6月5日)LAS所测感热通量的日变化情况;可见,与同图给出的净辐射的日变化趋势一致。临泽草地站虽然也在绿洲中,但其所在的临泽草地站与盈科站所在的张掖绿洲相比,较为破碎;而且当地属盐碱较重的湿地,植被生长也和盈科农田迥异。所以,即便晴天,也很难出现如图2左下所示盈科站的“绿洲效应”。

阿柔站典型晴天LAS所测的感热通量日变化趋势与图6相似。如在2008年3~10月每月选一个典型晴天,比较其逐月变化情况,可见该站的感热

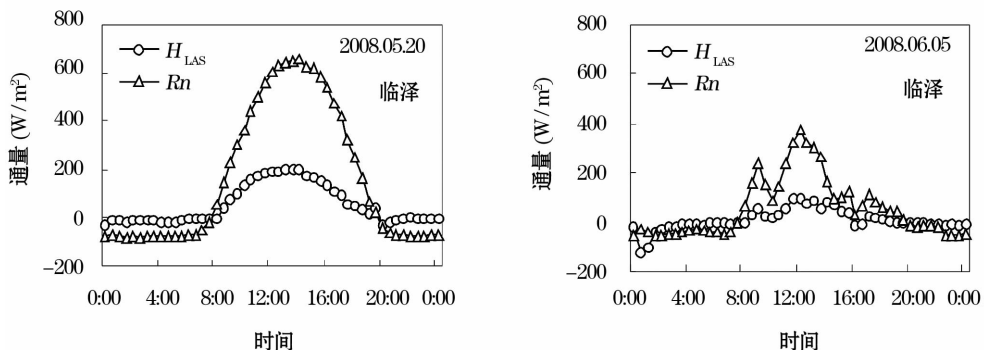


图 6 临泽草地站 LAS 观测感热通量的日变化;同图给出净辐射的日变化

Fig. 6 Diurnal variation of Heat flux observed by LAS at LZ station, the  $R_n$  is also shown for reference

通量除春季(3、4月)和秋季(9、10月)比夏季略大外,总的说季节变化不很明显(图7)。春、秋季节的净辐射比夏季的小,故春、秋季感热通量所占地面可利用能量的比例远大于夏季。这在一定程度上反映出该站温度和干、湿状况随季节的变化情况。

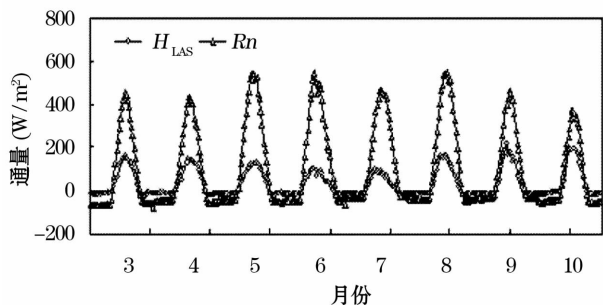


图 7 阿柔站 LAS 观测的感热通量的逐月日变化情况 (同图给出相应的净辐射值)

Fig. 7 Diurnal variation of Heat flux observed by LAS at AR station, the  $R_n$  is also shown for reference

涡动相关仪与大孔径闪烁仪都可用于观测感热通量。比较二者的观测数据,除相互印证外,还可得到很有意义的结果。上已述及,二者所测感热通量的量值基本一致;但差异也是明显的。以下以阿柔站 2 种仪器的观测结果为主分析。

图 8 给出阿柔站 6 月 11 日至 10 月 31 日近 5 个月白天(选净辐射大于  $10 \text{ W/m}^2$ ) 2 种仪器观测的感热通量比较的散点图。其中  $H_{LAS}$  和  $H_{EC}$  分别为 LAS 和涡动相关仪(EC)的观测结果,二者的相关性很好( $R^2 = 0.7488$ ),但  $H_{LAS}$  明显大于  $H_{EC}$ 。临泽草地站只有少数几天的涡动相关资料可用于比较,尽管 2 种仪器所测感热通量的差异没有这样大, $H_{LAS}$  也是大于  $H_{EC}$ 。

这种差异可能主要由 2 种仪器(传感器)的通量源区不同引起。图 9 给出阿柔站不同风向下 LAS 仪和涡动相关仪通量源区(footprint,采用解析模式)<sup>[19]</sup>的比较。阿柔站 LAS 的光程长达约 2.4 km,其通量源区远大于 EC 的。不同风向下二者的源区覆盖范围和重叠区也各有不同。据部分资料分析,风向为东南时  $H_{LAS}$  和  $H_{EC}$  的差异就小于风向为西北时的差异。由于源区大小的不同,2 种仪器响应的大气湍流涡旋尺度也可能不同,即 LAS 仪可能响应更大尺度的涡旋贡献,从而测得较大的湍流通量。这个问题尚需进一步仔细分析。

### 3.4 近地面能量平衡闭合情况的初步分析

图 10 给出盈科、阿柔 and 关滩 3 个站点近地层能量平衡闭合情况的对比分析。图中,盈科、关滩站为

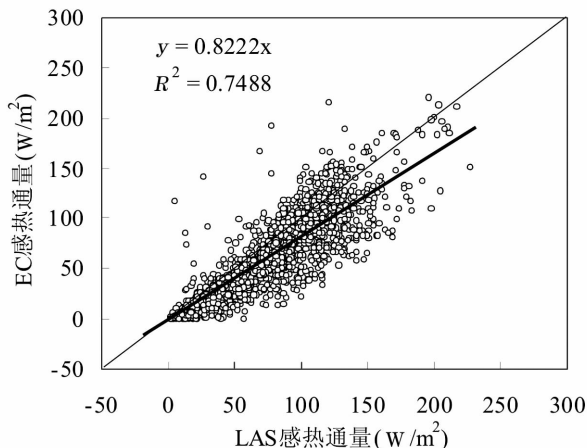


图 8 阿柔站 LAS 仪所测感热通量( $H_{LAS}$ )与涡动相关仪有关值( $H_{EC}$ )的比较(选用资料:2008 年 6 月 11 日至 10 月 31 日净辐射  $R_n > 10 \text{ W/m}^2$ 情况)

Fig. 8 Comparison of  $H_{LAS}$  and  $H_{EC}$  at AR station ( $R_n > 10 \text{ W/m}^2$ , June 11 ~ October 31, 2008)

1~10月观测数据,阿柔为6~10月观测数据。感热( $H$ )与潜热( $LE$ )通量为涡动相关仪的观测结果。土壤热通量 $G$ 已按2.2.3节的方法推算至地表。

按经典理论,感热通量与潜热通量之和应大致与近地层可利用能量即净辐射( $R_n$ )与地表土壤热通量( $G$ )之差相平衡。实际的观测结果却常难以达到。许多类似试验的能量闭环比,  $(H + LE) / (R_n - G)^{[3]}$ , 都在70%~90%之间。根据黑河3站的实际资料分析,盈科站和阿柔站的能量闭环比约分别为86%和87%,关滩站的闭环比仅为78%左右;图11中给出有关拟合式。

以上分析中并没有估算植被冠层热储存对能量不闭合的影响。对关滩站,因其平均树高达18~20m,森林冠层的热量收支会远大于计算闭环比中地

表土壤热通量的贡献。盈科站也有类似问题。Jakobs等<sup>[20]</sup>在分析中纬度草地能量闭合问题时,不仅考虑了冠层储存问题,还计算了光合作用、露水凝结—蒸发等的影响。Foken等<sup>[3]</sup>一再强调“能量闭合问题是一个尺度问题”。不同能量收支分量仪器(如净辐射仪、土壤热流板、涡动相关仪等)的观测源区大小各有不同,涡动相关通量的观测及数据处理中是否已包含主要尺度特别是较大尺度湍流涡旋的贡献等,这些问题都应在今后的研究分析中予以充分注意。

### 3.5 黑河试验区 CO<sub>2</sub> 通量的初步分析

不同下垫面 CO<sub>2</sub> 收支的分析是黑河试验生态过程研究的重要方面。准确估算农田、草地和森林生态系统与大气的碳交换是正确评价黑河地区陆地

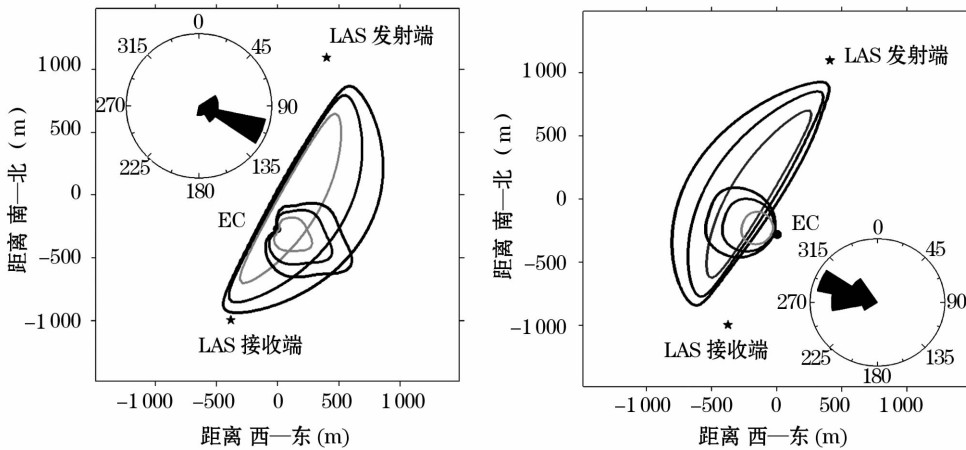


图9 阿柔站不同风向下LAS仪和涡动相关仪(EC)的通量源区(footprint)比较(选2008年7月5日资料;左图为当天7:00-10:00和16:30-19:00,风向SEE;右图为10:30-16:00,风向为NWW;各等值线由外到内分别表示80%,70%和50%的通量源区)

Fig. 9 Source area of LAS and EC at AR site (the line from outside to inside stands for 80%, 70%, 50% source area respectively) (a) 7:00-10:00 & 16:30-19:00; (b) 10:30-16:00

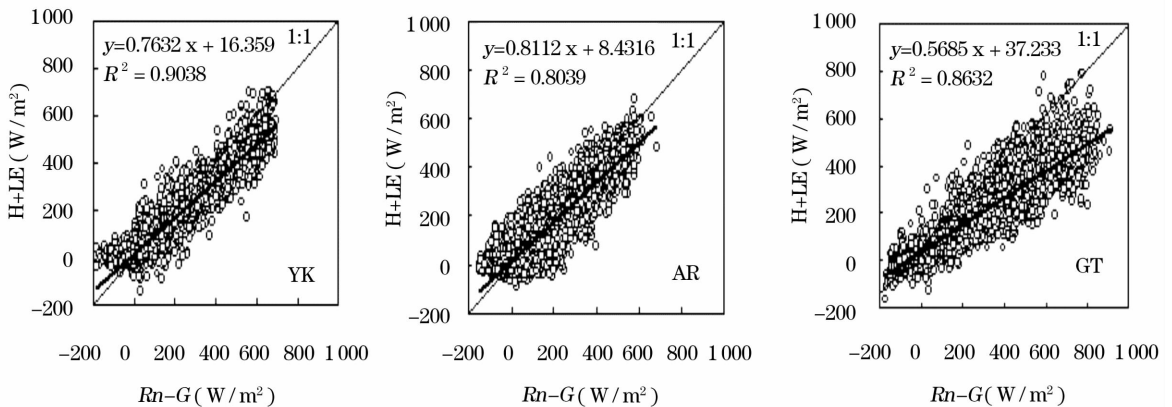


图10 盈科、阿柔和关滩3站近地面能量闭合情况对比

Fig. 10 Compare of energy balance closure over the whole experimental period at YK, AR and GT sites

生态系统碳汇的必要前提。试验期各站涡动相关系统积累了大量  $\text{CO}_2$  浓度和通量资料。这里只以图 11 为例,做一些通量值及其变化的初步分析。

图 11 给出作物生长季各站点  $\text{CO}_2$  通量的变化图。由图可见,盈科站在玉米生长期的  $\text{CO}_2$  通量呈现出较明显的 U 型结构;玉米生长中期光合作用旺

盛, $\text{CO}_2$  通量出现较大的负值。阿柔站  $\text{CO}_2$  通量的季节变化相对较小,但其值(负振幅)在生长中期(5~8月)也明显高于生长末期(9~10月)的情况;通量变化的“纺锤型结构”与草地植被的生长趋势相吻合。关滩站的  $\text{CO}_2$  通量在整个生长期内变化不明显,这和青海云杉的生长较慢相对应。

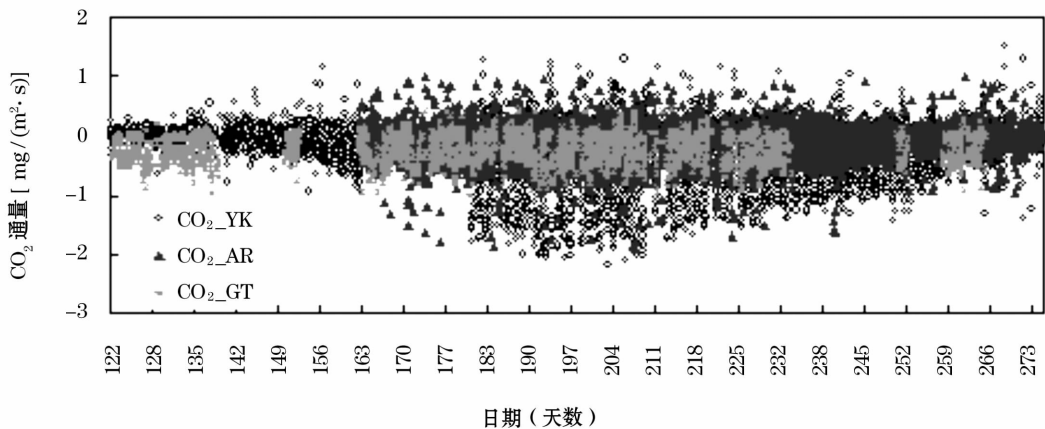


图 11 不同下垫面  $\text{CO}_2$  通量的季节变化

Fig. 11 Seasonal variation of  $\text{CO}_2$  flux at different sites

## 4 结 论

黑河综合试验期各地面通量站取得了大量观测资料。通过对不同下垫面能量收支各分量(净辐射、感热、潜热和土壤热通量)的初步分析可以得出以下几点结论:

(1) 各能量收支分量有明显的日变化和季节变化趋势。由于不同下垫面植被状态的差异,水热通量的日、季变化等有明显的不同。盈科站夏季蒸散量大,晴天白天的感热通量常出现负值(向下),表现出明显的“绿洲效应”特征。潜热通量和  $\text{CO}_2$  的季节变化特征与小麦—玉米生长季相适应。关滩站各量的季节变化最小,海拔较高的阿柔站则居中。

(2) 阿柔和临泽草地 2 个站点的 LAS 工作稳定,所观测的感热通量与涡动相关仪结果有较好的对应关系。阿柔站 LAS 的感热通量一般大于涡动相关仪测量值,可能主要由两者的源区(footprint)差异引起。不同风向下二者差异不同,反映了源区的覆盖区不同及下垫面的非均一性。对区域性研究,LAS 的观测应当有更好的代表性。

(3) 3 种类型下垫面的能量平衡闭合分析表明,在资料精细后处理基础上,盈科、阿柔和关滩 3 个站的能量闭合比分别达到 86%、87% 和 78%。关

滩站的闭合率较低,可能主要是森林冠层(18~20 m)内热储存的影响。其它站也有类似问题。

(4) 3 种不同类型下垫面  $\text{CO}_2$  通量的季节变化也有明显的不同。农田站夏季光合作用大, $\text{CO}_2$  通量在生长期内呈现明显的 U 型结构;草地下垫面  $\text{CO}_2$  通量相对变化较小,森林站的变化最不明显。

**致谢:**胡泽勇研究员及其领导的小组在仪器架设、站点维护及数据收集过程中付出了辛勤的劳动,在此深表谢意。

## 参考文献 (References):

- [1] Baldocchi D 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 Meteorological Society*, 2001, 82: 2 415-2 435.
- [2] Li Xin, Ma Mingguo, Wang Jian, et al. Simultaneous remote sensing and ground based experiment in the Heihe river basin: Scientific objectives and experiment design[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23 (9): 897-914. [李新, 马明国, 王建, 等. 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案[J]. *地球科学进展*, 2008, 23 (9): 897-914.]
- [3] Foken T. The energy balance closure problem: An overview[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1 351-1 367.
- [4] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Ao Yinhan, et al. Turbulence



- flux measurements under complicated conditions[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(8): 791-797. [王介民, 王维真, 奥银焕, 等. 复杂条件下湍流通量的观测与分析[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 791-797.]
- [5] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, *et al.* Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103: 279-300.
- [6] Meijninger W M L, De Bruin H A R. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillometer[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229: 42-49.
- [7] Lu Li, Liu Shaomin, Sun Minzhang, *et al.* Advances in the study of areal surface fluxes with large aperture scintillometer [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(9): 932-938. [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, 20(9): 932-938.]
- [8] Lee X, Massman W, Law B, *et al.* Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis [M]. Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [9] Xu Ziwei, Liu Shaomin, Gong Lijuan, *et al.* A study on the data processing and quality assessment of the eddy covariance system [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(4): 357-370. [徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370.]
- [10] Falge E, Baldocchi D D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 71-77.
- [11] Ochs G R, Wilson J J. A second-generation large aperture scintillometer[R]. NOAA Technical Memoranda ERL ETL-232, NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO USA, 1993: 24.
- [12] Kohseik W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, *et al.* Saturation of the large aperture scintillometer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 111-126.
- [13] Lu Li. A Study on the Observation, Influencing Factors and Scale Relationships of the Sensible Heat Flux [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2008. [卢俐. 地表感热通量的观测、影响因素和尺度关系的研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2008.]
- [14] Andreas E L. Estimating  $C_n^2$  over snow and sea ice from meteorological data [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1988, 5: 481-495.
- [15] Yang Kun, Wang Jiemin. A temperature prediction-correction method for estimating surface soil heat flux from soil temperature and moisture data [J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(2): 243-250. [阳坤, 王介民. 一种基于土壤温湿资料计算地表土壤热通量的温度预报校正法 [J]. 中国科学: D辑, 2008, 38(2): 243-250.]
- [16] Oke T R. *Boundary Layer Climates* [M]. New York: Methuen, 1987: 435.
- [17] Wang J, Mitsuta Y. An observational study of turbulent structure and transfer characteristics in Heihe oasis [J]. *Journal of Meteorological Society Japan*, 1992, 70: 147-154.
- [18] Wang Jiemin. Land surface process experiments and interaction study in China—From HEIFE to IMGRASS and GAME Tibet/TIPEX [J]. *Plateau Meteorology*, 1999, 18(3): 280-294. [王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/ TIPEX [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 280-294.]
- [19] Peng G, Cai X, Zhang H, *et al.* Heat flux apportionment to heterogeneous surfaces using flux footprint analysis [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2008, 25: 107-116.
- [20] Jakobs F G, Heusinkveld B G, Holtslag A M. Towards closing the surface energy budget of a mid-latitude grassland [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 12(6): 125-136.

# The Characteristics of Heat and Water Vapor Fluxes over Different Surfaces in the Heihe River Basin

WANG Weizhen<sup>1</sup>, XU Ziwei<sup>2</sup>, LIU Shaomin<sup>2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>,  
MA Mingguo<sup>1</sup>, WANG Jiemin<sup>1,2</sup>

(1. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 2. *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

**Abstract:** Several flux stations at difference surfaces have been established for the project “Simultaneous remote sensing and ground based experiment in the Heihe River basin”. In this paper, we selected the observation data on grasslands, forests and farmland and analyzed the characteristics of water vapor, heat and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) fluxes. The results showed that there are obvious diurnal and seasonal variations of energy balance components (net radiation, sensible heat, latent heat and soil heat flux, *etc.*) and different surface in the Heihe River basin has distinct characteristics. The Eddy-Covariance (EC) flux data have been compared with Large Aperture Scintillometer (LAS) observations at Arou Station (in the upper Heihe Basin) and Linze Station (in the middle basin). Both have good correlations, however, the sensible heat fluxes observed by LAS are generally larger than that of EC. The differences are mainly from the different footprints' or source areas of LAS and EC in the non-uniform surfaces of the specific station. Besides, LAS observation of heat flux may comprise contributions from larger scale atmospheric turbulence. By considering soil heat storage in the upper soil layers, the surface energy balance closure has also been analyzed in each station.

**Key words:** Heihe experiments; Difference surface; Water and heat flux; Eddy correlation; LAS.