

文章编号: 1001-8166(2010)11-1187-12

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

白 洁, 刘绍民*, 晓萍

(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: 基于海河流域密云站、馆陶站和大兴站 2008—2009 年大孔径闪烁仪的观测数据, 结合涡动相关仪和自动气象站的同步观测, 经过数据筛选、质量评价、数据处理及插补等步骤, 得到了 3 个站点不同时间尺度的显热通量和蒸散量。首先分析了 3 个站点 1 月、4 月、7 月、10 月不稳定状态下大孔径闪烁仪通量观测的空间代表性及源区内不同下垫面的通量贡献率, 并结合下垫面作物生长状况比较分析了 3 个站点不同季节大孔径闪烁仪观测显热通量与净辐射的月平均日变化趋势, 不同下垫面上两者变化趋势一致, 且馆陶站的显热通量在各月中都为最低, 1 月、7 月密云站的显热通量与大兴站较为接近。同时 3 个站点 2008—2009 年 9 00~15 00 显热通量日平均值的季节变化趋势表明, 相对于密云站单峰状的季节变化, 源区内下垫面的植被类型和植被生长状况导致馆陶站和大兴站的显热通量都表现出明显的三峰变化。最后, 以馆陶站大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测的 30 min 显热通量数据为例, 结合涡动相关仪的能量闭合率, 大孔径闪烁仪和涡动相关仪通量足迹源区的重叠程度和非重叠部分的地面非均一性, 对不同尺度显热通量观测的差异原因进行了讨论。

关 键 词: 大孔径闪烁仪; 显热通量; 海河流域; 时空特征分析

中图分类号: P343 P404

文献标志码: A

1 引 言

地表水热通量是全球水循环的重要组成部分, 是全球能量平衡的重要环节和关键变量, 同时也是全球气候变化和地球系统等研究的基础。当前国内外众多的大型实验越来越多的集中在如何精确定量地获取大尺度水热通量。然而, 由植被覆盖度、植被类型或是降水等原因引起的地表非均一性, 会造成地表通量显著的空间变化, 因此单独依靠传统的单点观测方法在这样复杂的下垫面上难以获得区域尺度上时间连续的水热通量。随着闪烁仪 (Scintillm-

eter) 测量大尺度水热通量广泛性的逐渐增加, 其在水资源管理、农业节水等研究以及对遥感估算的大面积显热/潜热通量进行验证和标定等方面都得到了不同程度的应用。其中应用较为广泛的是大孔径闪烁仪 (Large Aperture Scintillometer, LAS), 它在近红外波段范围内对湍流大气中主要由温度和湿度的波动引起的空气密度的波动, 即空气折射指数的结构参数 C_n^2 进行测量, 进而基于莫宁—奥布霍夫相似理论来推算湍流通量。

在国内外开展的众多试验中, 所涉及的下垫面从均一到复杂, 各不相同, 很多学者通过结合涡动相

收稿日期: 2010-08-03 修回日期: 2010-09-15

* 基金项目: 公益性行业 (气象) 科研专项“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究” (编号: GYHY200706046); 国家自然科学基金项目“地表水热通量的时空尺度扩展研究” (编号: 40971194); 中德合作项目“基于遥感和数据同化方法的海河流域水文通量预测研究—SP2: 不同尺度蒸散量和土壤水分的观测研究” (编号: 30911130504) 资助。

作者简介: 白洁 (1984-), 女, 内蒙古包头人, 博士研究生, 主要从事地表通量观测数据的处理与分析研究。

E-mail: baijie@mail.bnu.edu.cn

* 通讯作者: 刘绍民 (1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事陆面过程观测与遥感应用研究, E-mail: sm.liu@bnu.edu.cn

关仪同步观测的显热通量以及试验场下垫面状况, 对不同下垫面上大孔径闪烁仪观测的显热通量进行了研究。De Buin 等^[1]和 McAneney 等^[2]最先将大孔径闪烁仪应用在均一下垫面——干旱的葡萄园和平坦裸露的草场。随后, Anandakumar^[3]、Cain 等^[4]和 Hoedjes 等^[5]也分别在裸露的农田、均一的裸地和灌溉一致的农田下垫面上对大孔径闪烁仪和涡动相关仪测量的显热通量进行了比较, 结果表明, 均一下垫面上两者的估算结果一致。在非均一下垫面上展开的研究则考虑了土地利用类型、植被、土壤水分状态等不同因素造成的地表非均一性。Xu 等^[6]利用黑河流域阿柔站高山草原下垫面上架设的大孔径闪烁仪, 得到了公里级尺度地表通量, 并结合涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测的足迹以及高分辨率遥感影像提供的源区内下垫面特征(地表温度), 对涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量的差异原因进行了分析, 认为两者的差异主要是由于涡动相关仪的能量闭合率、下垫面的非均一性以及涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量源区的重叠程度等引起。Meijninger 等^[7]通过对 LITFASS2003 试验中森林和混合农田下垫面上大孔径闪烁仪的结果进行分析, 认为在掺混高度以上, 大孔径闪烁仪可以提供区域平均的通量, 而在掺混高度以下, 应结合足迹模型, 获取合理的具有代表性的结果。同时, Chebouni 等^[8]在 SALSA 项目中研究了大孔径闪烁仪在复杂地表上观测显热通量的代表性, 包括了植被覆盖类型和覆盖度的差异, 以及地势的变化。Ezzahar 等^[9]分别在橄榄树、小麦地和稀疏桔园等复杂下垫面上对涡动相关仪和大孔径闪烁仪在灌溉前及灌溉期间的观测值进行了比较, 结果表明, 在不同类型下垫面上考虑地表非均一性后, 大孔径闪烁仪观测的显热通量值是合理可信的。由此可见, 需要结合足迹模型对由土地利用类型、植被覆盖度以及土壤水分等差异引起的非均一下垫面上大孔径闪烁仪观测的通量值进行分析。与此同时, Kanda 等^[10]、Roth 等^[11]和 Lagouarde 等^[12]通过对城市下垫面上大孔径闪烁仪观测的结果进行比较研究, 认为利用大孔径闪烁仪获取城市下垫面的区域地表通量也是可行的。

利用各种试验获取的大孔径闪烁仪的观测数据, 先后有众多学者对其区域尺度显热通量时空特征进行了分析。Moene 等^[13]、Beyrich 等^[14]、Schmeyer 等^[15]和 Lagouarde 等^[16]都对由大孔径闪烁仪观测的显热通量的日变化进行了分析, 结果表明无论在晴天还是阴天状况下, 由大孔径闪烁仪观

测的显热通量与净辐射的日变化规律是一致的, 其中, 大孔径闪烁仪观测的显热通量主要会受到降水及云的影响, 这是由于大孔径闪烁仪的平均时间较短, 相对于涡动相关系统可以更好地捕捉到短时间的天气系统(如阴天), 这与 Kleissl 等^[17]在不同下垫面(包括均一及非均一下垫面, 干旱及潮湿下垫面等)上对 5 台闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量进行比较的结论是一致的。卢俐等^[18]分别对均一和非均一下垫面上大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的日变化进行了比较, 认为两者日变化趋势一致, 但在非均一下垫面上大孔径闪烁仪的观测值更为平滑; 同时也对山区林地下垫面大孔径闪烁仪、涡动相关仪观测显热通量与净辐射的变化趋势及各自源区内不同下垫面的相对权重值密切相关。但是在目前试验中, 同时对不同下垫面上大孔径闪烁仪的长期观测显热通量的时空特征进行的分析还较少。

本文拟利用 2008—2009 年海河流域北京密云站、大兴站、河北馆陶站的大孔径闪烁仪观测数据, 分析显热通量的时空特征, 包括不同季节大孔径闪烁仪观测显热通量的源区范围以及源区内不同地物的贡献率, 不同下垫面上显热通量的日、季节变化; 并以馆陶站 2008 年大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测数据为例, 分析不同观测尺度上获取的显热通量的差异及原因。

2 数据与方法

2.1 观测站点

本文所用数据包括了海河流域不同下垫面上密云站、馆陶站和大兴站(图 1) 2008—2009 年的观测数据。

密云观测站(MY)($40^{\circ}37'51''\text{N}$, $117^{\circ}19'24''\text{E}$)在海河流域西北部密云县新城子镇, 代表海河流域北部山区类型。观测场位于新城子镇一个宽度约 500~1 000 m, 长度约 2 420 m 的西南—东北走向的山谷中, 从 2006 年 8 月开始正式观测。下垫面主要为果树(李子树, 苹果树)和玉米裸地, 果树的生长期为 4~10 月, 玉米为 6~9 月, 为典型的山区园地、农作物混合下垫面。观测仪器包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪及自动气象站等。大孔径闪烁仪的接收仪与发射仪架设在南北两座小山顶上, 光径长度为 2 420 m, 有效高度 35.86 m。自动气象站和涡动相关仪安装在高为 31.5 m 的铁塔上, 沿大孔径闪烁仪光程路径, 且距离光程路径中点处约 450 m, 涡动相关仪架高为 26.66 m。自动气象站的观测项目包括

2 层风、温、湿、降水量、气压、向下(上)长(短)波辐射,同时还有地表辐射温度、土壤热通量(0.02 m)、7 层土壤温度(0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1 m)、6 层土壤水分(0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、1 m)等。

馆陶观测站(GT)(36°30′54″N, 115°07′39″E)位于海河流域南部的河北省馆陶县河寨村,代表海河流域平原类型,自 2007 年 8 月开始正式观测。观测场及其周围为农田下垫面,包括冬小麦/玉米、棉花,其中冬小麦与玉米为轮作,冬小麦经历越冬期后,3 月初返青,6 月成熟收割,玉米生长期为 6~9 月,棉花为一季,生长期为 6~9 月,为典型的华北平原农田下垫面。观测仪器包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪及自动气象站等。大孔径闪烁仪的发射仪及接收仪南北放置,光径长度为 2 760 m,有效高度为 15.6 m。涡动相关仪和自动气象站位于大孔径闪烁仪光程路径的中点处,其中涡动相关仪架高 15.6 m,自动气象站的观测项目包括风、温、湿、降水量、气压与净辐射、向下(上)长(短)波辐射,同时还有

地表辐射温度、土壤热通量(0.02 m)、8 层土壤温度(0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1 m)、7 层土壤水分(0.02、0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、1 m)等。

大兴观测站(DX)(39°37′17″N, 116°25′37″E)位于海河流域中部偏北的北京市大兴区魏善庄,自 2008 年 5 月正式开始观测。观测场下垫面为冬小麦/玉米、瓜果和蔬菜等,为海河流域典型的城郊作物下垫面。观测仪器包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪及自动气象站等。大孔径闪烁仪的发射仪与接收仪东北—西南向放置,光径长度为 2 480 m,有效高度为 29.6 m。涡动相关仪放置在距离发射仪铁塔约 20 m 的三角架上,架高 3 m。自动气象站安装在高 30 m 的大孔径闪烁仪发射仪铁塔上,观测项目包括风、温、湿、降水量、气压以及向下(上)长(短)波辐射、地表辐射温度、土壤热通量(0.02 m)、7 层土壤温度(0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1 m)、6 层土壤水分(0.05、0.1、0.2、0.4、0.6、1 m)等。

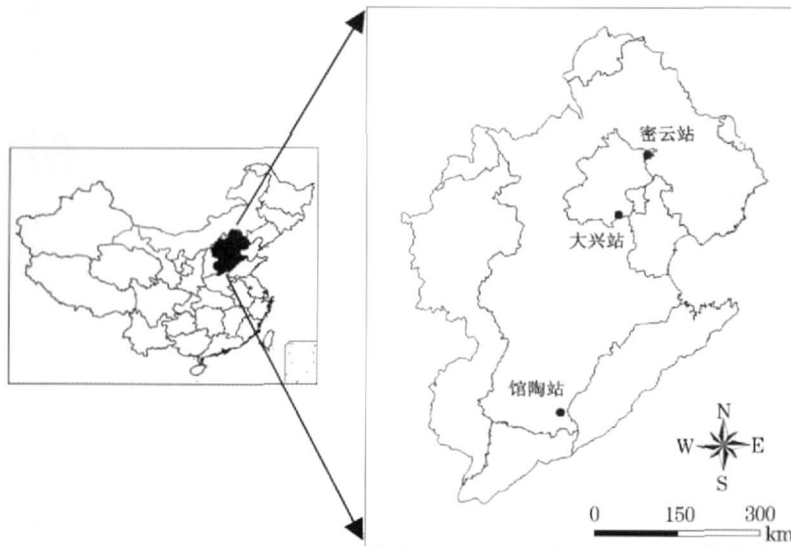


图 1 海河流域观测站分布位置图

Fig 1 Location of observation sites

2.2 观测数据的处理

(1) 大孔径闪烁仪

大孔径闪烁仪观测数据的处理包括了数据筛选、显热通量的计算以及缺失数据插补等步骤^[19]。为了保证数据的合理有效性,首先对原始的观测数据进行了筛选,包括:①剔除空气折射指数结构参数 C_n^2 达到饱和的数据,其中,根据 Ochs 等^[20]给出的 C_n^2 饱和上限,计算得到密云站、馆陶站和大兴站 C_n^2 的饱和上限分别为 $7.58\text{E}-14$ 、 $5.34\text{E}-14$ 和 7.18E

$-14\text{ m}^{-2/3}$;④剔除降雨时次的的数据;④剔除解调信号强度较小的数据,密云站、馆陶站和大兴站解调信号强度的阈值分别为 -30 、 -10 和 -10 mV ;④剔除夜间弱湍流数据。经过数据筛选得到的 C_n^2 值即可参与显热/潜热通量的计算。首先,由 C_n^2 经过湿度订正可以计算得到与显热通量有关的温度结构参数 C_T^2 ,再结合气象数据(风速、温度等)、下垫面状况(零平面位移及动力学粗糙度),以及大孔径闪烁仪架设的有效高度^[19](密云站、馆陶站和大兴站的有

效高度分别为 35. 86 15 60和 29 60 m), 基于莫宁—奥布霍夫相似理论, 通过大气稳定度的判断, 并选取合适的稳定度函数, 分别在稳定和不稳定状态下, 经过迭代计算得到 30 m in 平均的显热通量。显热通量计算中所需的零平面位移根据每月观测的植被高度 (h), 由 $d = 2h / 3$ 计算得到^[21, 22]; 动力学粗糙度 z_{0m} 则利用涡动相关仪的观测数据, 根据 Yang 等^[23] 提出的最小代价方程计算。

(2) 涡动相关仪

为确保观测数据的质量, 首先需要从涡动相关仪原始观测的 10 Hz 数据出发, 采用英国爱丁堡大学发展的 EdRe 软件对观测数据进行处理, 其处理步骤主要包括^[24]: 野点值的剔除、延迟时间的校正、超声虚温转化为空气温度、坐标旋转 (平面拟合法)、空气密度效应的修正 (即 WPL 修正) 等。同时

对观测数据进行了严格的质量控制, 包括阈值检查、摩擦风速检验、湍流强度以及湍流的平稳性、发展的充分性与频谱分析等。

(3) 辅助数据

文中所用辅助数据包括 3 个站点的土地利用图 (1: 10 万) (图 2)。其中, 大兴站的土地利用 覆盖图基于 2008 年 30 m 分辨率的 TM 图像制作, 密云站和馆陶站的土地利用 覆盖图分别根据 2005 年 10 月 2 m 分辨率的航片和 2. 5 m 分辨率的 SPOT 图像 (2007 年 6 月 15 日) 重采样至 30 m 分辨率再进行制作的。

分析中用到的地表温度是基于 Landsat TM 数据, 经过几何纠正、辐射校正以及基于卫星过境日的探空数据进行的大气校正, 最后根据覃志豪单窗算法^[25] 估算得到地表真实温度。

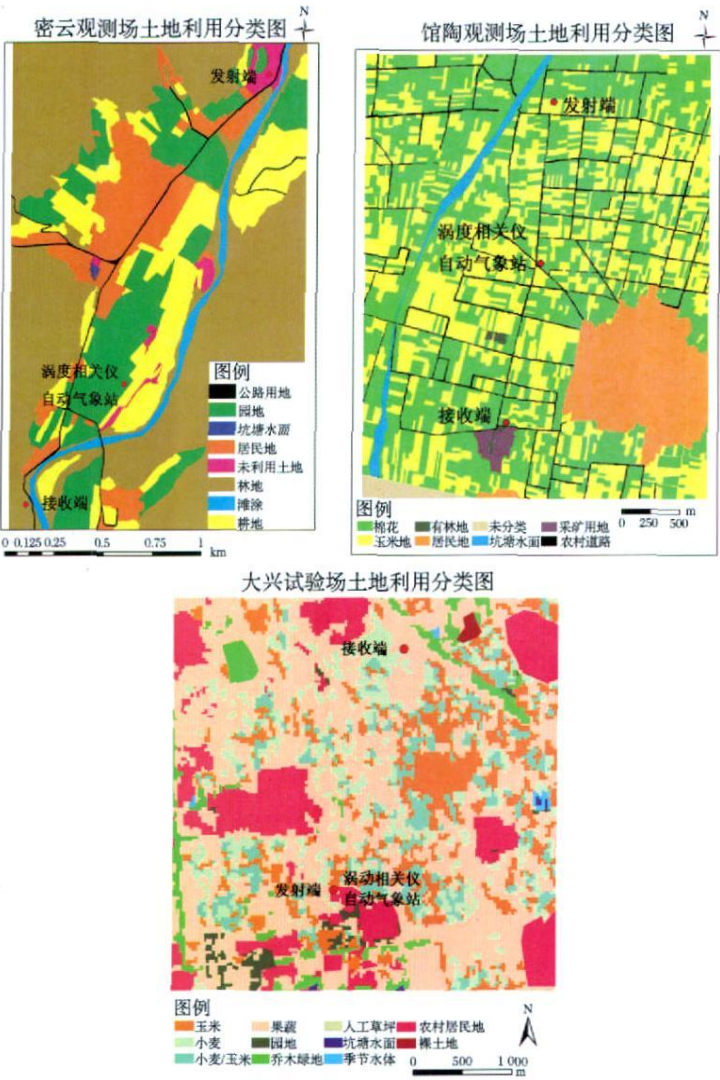


图 2 密云站、馆陶站和大兴站的土地利用 / 覆盖图接收端

Fig 2 Landuse/Land cover map ofM iyun, Guantao and Dax ing

2.3 足迹模型

通量观测的空间代表性是指仪器的测量值能在多大程度上反映实际下垫面的平均或累积状况。足迹 (footprint) 又称为源权重函数 (source weight function), 是描述近地面层表面源或汇的空间分布和仪器观测值之间关系的函数。本文中所用涡动相关仪和大孔径闪烁仪的通量足迹模型依据彭光亮等^[26]、双喜^[27]基于 Komann 等^[28]的模型以及将点通量的足迹函数与 LAS 的空间权重函数相结合的方法而建立。

通量足迹模型的网格分辨率为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 计算的时间步长为 30 min 。其中月足迹的计算是基于 6:00~22:00 间涡动相关仪观测显热通量大于 0 W/m^2 的数据, 采用算术平均法对各个时刻的足迹进行叠加得到。

3 结果分析

3.1 空间代表性

图 3 描绘了密云站、馆陶站和大兴站 2008 年 1 月、7 月不稳定状态下大孔径闪烁仪观测显热通量 50%、80% 和 80% 观测通量源区的分布。密云站大孔径闪烁仪的观测通量源区沿着其发射端和接收端的光线路径呈东北—西南向, 分布在长约 $1\,500\text{ m}$ 、宽约 400 m 的范围内, 其长度约为光径路线长度的 70%。馆陶站全年主风方向为南—北风方向, 大孔径闪烁仪的源区也呈南北方向, 分布在长约 $2\,700\text{ m}$ 、宽约 800 m 的范围内, 其长度与光径路线长度近似。馆陶站各月主要以正北或正南方向的风为主, 但是 1 月有少量东北或西南方向风出现, 造成馆陶站该月不稳定状态下的源区范围相对较宽, 约为 800 m , 7 月则主要以南北方向风分布为主, 大孔径闪烁仪的源区宽约 500 m 。大兴站大孔径闪烁仪的通量源区则呈西南—东北向, 分布在长约 $2\,000\text{ m}$ 、宽约 $1\,500\text{ m}$ 的范围内, 其长度与光径路线长度近似。7 月风向多沿西南—东北向分布, 而 1 月存在着西北方向的风, 造成了大兴站 1 月不稳定状态下源区范围明显宽于 7 月。同时, 从图 3 可见, 1 月、7 月密云站、馆陶站和大兴站大孔径闪烁仪的通量源区范围和足迹值都表现出不同的差异, 其中大兴站较为明显。

通量源区范围的不同、土地利用/覆盖类型通量贡献率与植被物候期的变化影响到各月大孔径闪烁仪观测显热通量值。图 4 为 2008 年 1~12 月密云

和馆陶 2 个站点大孔径闪烁仪源区内各种土地利用/覆盖类型的通量贡献率。从图 4 可知, 密云站的园地在全年各月对大孔径闪烁仪观测值的影响最大, 为 60% 左右, 其次为耕地和居民地, 二者所占通量贡献率约为 25% 和 15%。生长季的 4~9 月期间, 耕地和居民地的通量贡献率接近且变化较小 (除 7 月外)。在馆陶站, 除农村道路用地所占的贡献率较小外 (全年均约为 10%), 棉花地和冬小麦/玉米地对大孔径闪烁仪观测值的影响最大, 且通量贡献率近似相等, 都为 45% 左右。

3.2 大孔径闪烁仪观测显热通量的季节变化

图 5 是以密云站、馆陶站与大兴站 2008 年 1 月、4 月、7 月、10 月 (其中大兴站 1 月、4 月为 2009 年) 内每日相同时刻的数据平均, 而得到每 30 min 观测的净辐射 R_n 和显热通量 H_{LAS} 为例, 对不同下垫面上 LAS 观测显热通量季节变化进行分析。馆陶站的显热通量在各个季节中都为最低, 1 月、7 月密云站的显热通量和大兴站较为接近。在 1 月, 显热通量是净辐射的主要分配方式, 随着净辐射的增加, 3 个站点观测的显热通量都在 4 月达到了最大值, 7 月随着下垫面植被生长的茂盛, 显热通量出现最小值。其中, 4 月密云站、馆陶站和大兴站显热通量的最大值为 257.9 W/m^2 、 135.7 W/m^2 和 186.9 W/m^2 , 约占净辐射的 66.3%、35.4% 和 39.3%; 7 月密云站、馆陶站和大兴站显热通量的最大值仅为 118.1 W/m^2 、 77.5 W/m^2 和 123.1 W/m^2 , 分别占净辐射的 22.6%、19.0% 和 27.6%。

图 6 为密云站、馆陶站和大兴站 2008—2009 年大孔径闪烁仪每日 9:00~15:00 间每 30 min 观测的显热通量数据的平均值。如图 6 所示, 各个站点的显热通量虽都表现出明显的季节变化, 但是其量值与变化趋势又各不相同, 这与下垫面的植被类型和植被生长状况相一致, 密云站显热通量的季节变化呈单峰, 在 7 月下旬达到最小值。而大兴站和馆陶站潜热通量的季节变化分别呈三峰变化趋势, 分别在 5 月中旬和 7 月下旬出现最小值。这是由于馆陶站和大兴站为两季作物 (冬小麦和玉米), 显热通量分别在 2 种作物生长旺季出现最小值, 其中冬小麦的生长旺季为 5 月中下旬, 玉米的生长旺季为 8 月。全年而言, 密云站日平均显热通量比馆陶站和大兴站都大, 以 2009 年 3 个站点同步观测数据为例, 密云站最大值为 4 月 10 日的 351.5 W/m^2 , 而馆陶站和大兴站显热通量的最大值仅为 6 月 10 日的 304.4 W/m^2 和 3 月 10 日的 299.7 W/m^2 。

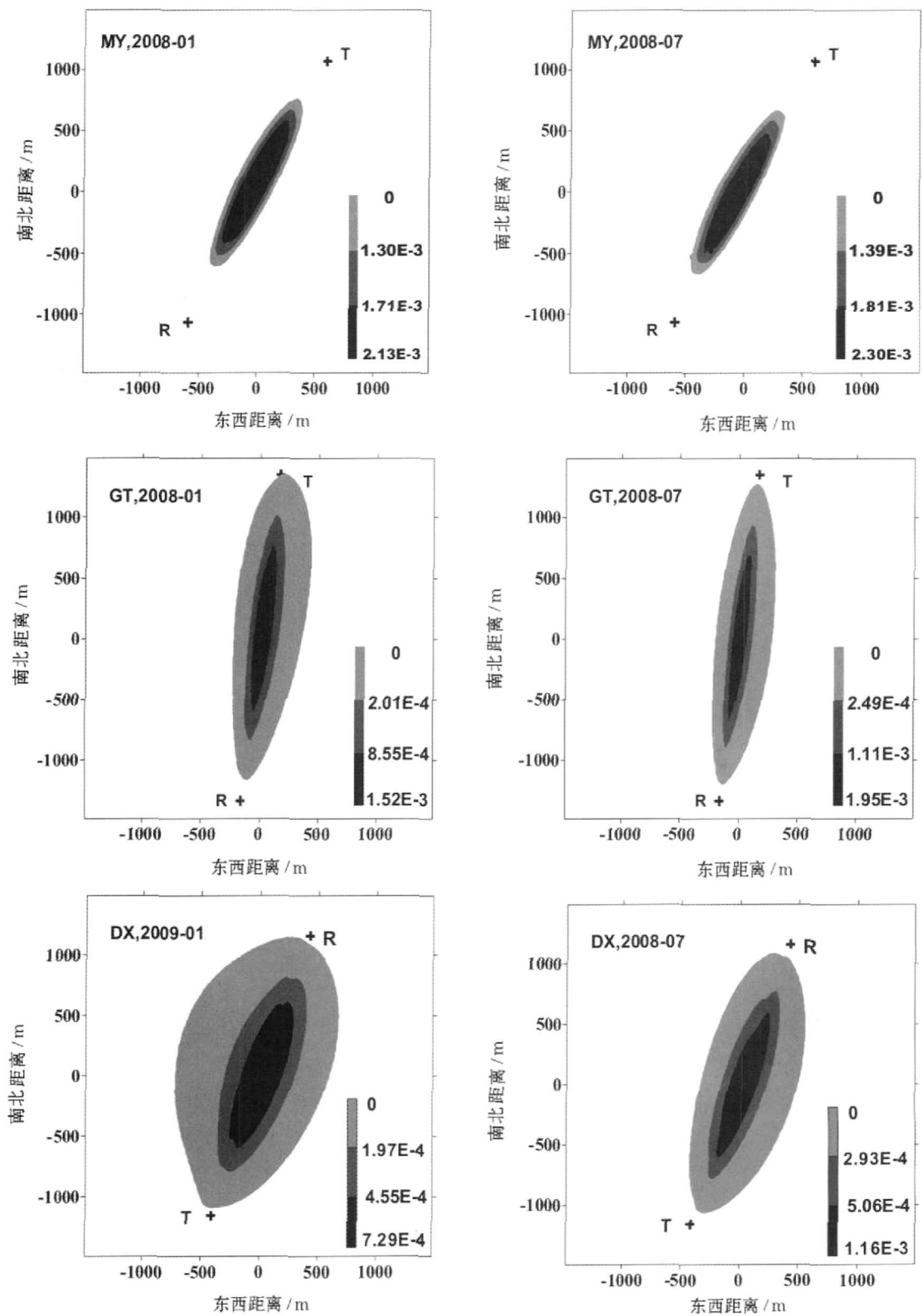


图 3 2008 年 密云站 (MY)、馆陶站 (GT) 与大兴站 (DX) 1 月、7 月 LAS 观测通量源区的分布

Fig.3 The distribution of source area for LAS in Miyun (MY), Guantao (GT) and Daxing (DX) site in January and July
不稳定状况下 50% 源区 (MY)、80% 源区 (DX>), T: 发射端, R: 接收端
(unstable, 50% (MY) 80% (GT & DX) source area, T: Transmitter, R: Receiver)

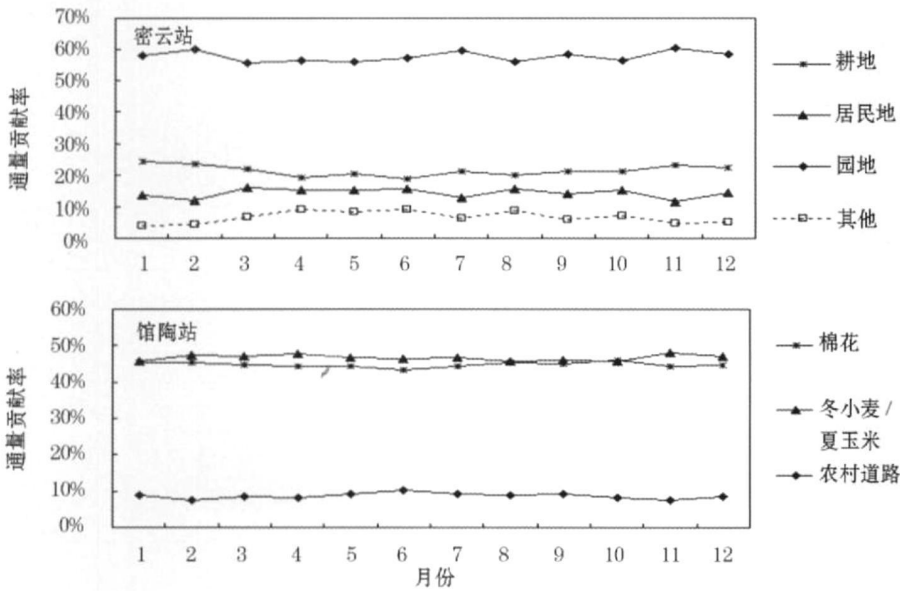


图 4 2008 年密云与馆陶站 LAS 观测通量源区内不同土地利用/覆盖类型的通量贡献率
(密云站 50% 源区, 馆陶站 80% 源区)

Fig. 4 Flux contributions of the different land cover categories to the measured sensible heat fluxes in Miyun (50%), Guantao (80%) Site, 2008

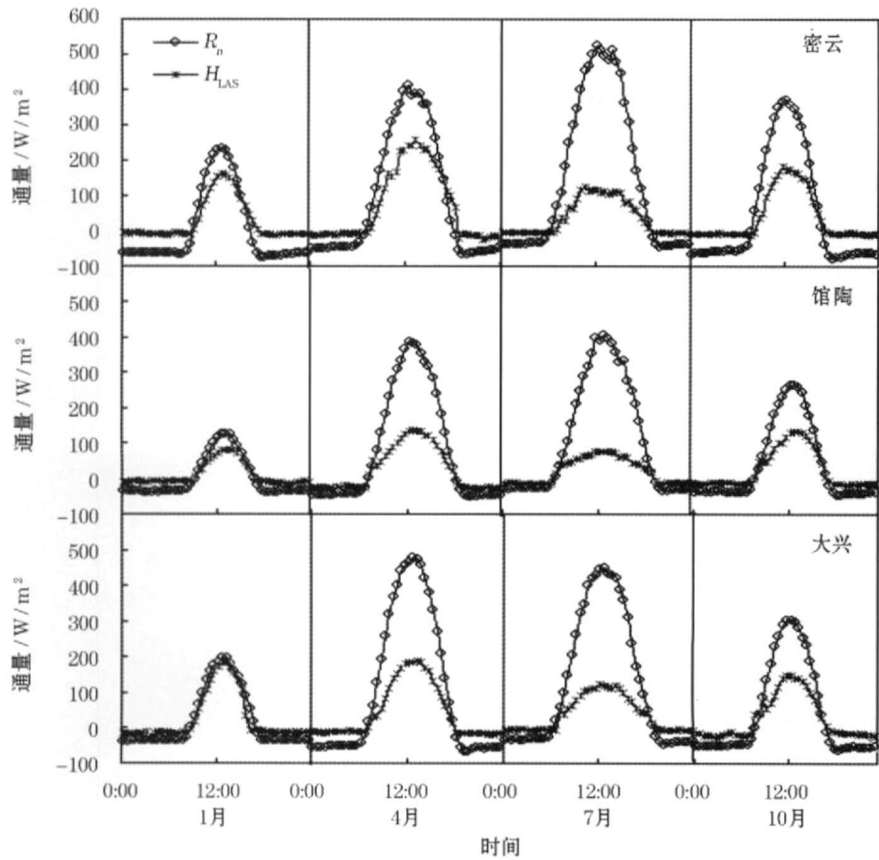


图 5 不同站点 2008 年 1 月、4 月、7 月、10 月大孔径闪烁仪观测显热通量的变化(大兴 1 月、4 月为 2009 年)

Fig. 5 Daily variation of H_{LAS} over different sites in January, April, July and October, 2008 (the data of Daxing of January and April are in 2009)

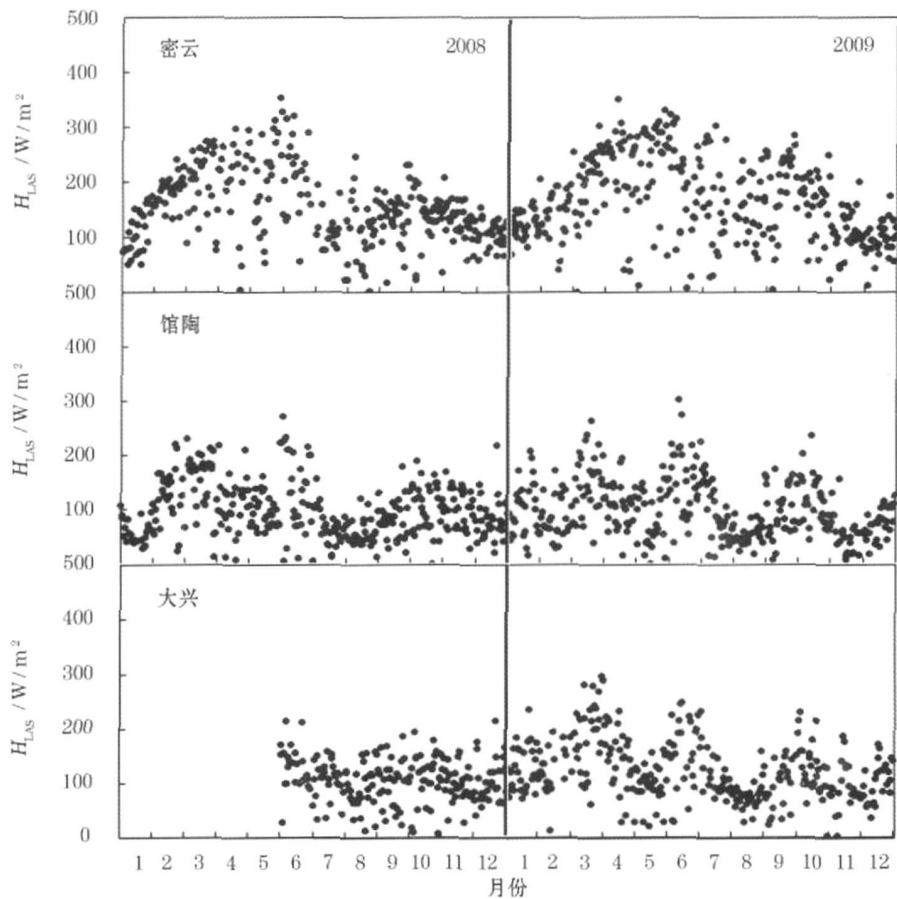


图 6 2008—2009 年不同站点 LAS 观测显热通量 H_{LAS} (9:00~15:00) 的季节变化
Fig 6 Seasonal variation of H_{LAS} (9:00~15:00) over different sites from 2008 to 2009

3.3 大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的比较

以馆陶站 2008 年生长季 (4~9 月) 大孔径闪烁仪和涡动相关仪同步观测的显热通量为例, 对不同尺度显热通量的观测结果进行了比较。为了避免稳定与不稳定状态交替时刻的影响, 选取了 H_{LAS} 、 H_{EC} 均大于 50 W/m^2 的数据, 同时剔除了相对湿度大于 85% 的数据, 避免信噪比较小对大孔径闪烁仪观测数据造成的影响。

从图 7(左) 可知, 大部分时刻 H_{LAS} 较 H_{EC} 值都偏大, 两者的相关系数为 0.7285, 均方差 $RMSD$ 为 49.9 W/m^2 。考虑到涡动相关仪观测的显热通量存在着能量不闭合现象, 因此需要分析涡动相关仪的能量闭合率对 H_{LAS} 和 H_{EC} 差异的影响。从图 8 中可见, 随着涡动相关仪能量闭合率的增加, H_{LAS} 与 H_{EC} 差异减小, 即 $(H_{LAS} - H_{EC}) / H_{EC}$ 趋向于 0。但当能量闭合率增加到一定值, 约为 0.85 时, H_{LAS} 与 H_{EC} 之间的差异与涡动相关仪能量闭合率的关系不再显著。因此, 选取涡动相关仪能量闭合率大于 0.8 的数据进

行分析。如图 7(右) 所示, 排除能量闭合率对 H_{LAS} 与 H_{EC} 的比较所造成的影响后, H_{LAS} 与 H_{EC} 的相关系数为 0.8343, 均方差为 42.9 W/m^2 。

馆陶站观测场的农作物在 4~9 月期间处于不同的发育期, 因此, 结合不同农作物的物候期和 MODIS 图像在观测期间获取地表温度的变化趋势, 可以将观测时间分为以下 3 个时间段: ① 4 月 1 日至 5 月 18 日, ④ 5 月 19 日至 7 月 6 日, ④ 7 月 7 日至 9 月 30 日。在阶段 ①, 下垫面内只有冬小麦生长; 阶段 ④ 为棉花生长初期, 冬小麦成熟收割阶段及其后的玉米生长初期; 阶段 ④ 为棉花与玉米的生长旺盛阶段。对 3 个不同阶段内能量闭合率 $EBR > 0.85$ 的 H_{LAS} 与 H_{EC} 的关系进行统计分析, 分别为: $H_{LAS} = 1.22 \times H_{EC}$, $H_{LAS} = 1.29 \times H_{EC}$ 以及 $H_{LAS} = 1.16 \times H_{EC}$ 。在阶段 ④ H_{LAS} 与 H_{EC} 的差异最大。如 6 月份, EC 源区内以冬小麦为主, 约占 53.87%, 棉花地仅为 26.96%, 而 LAS 源区内 2 种地物的比例在 4~9 月相差并不显著 (图 4)。在阶段 ④, EC 源区内以夏玉米为主, 其生长状况也与棉花地类似, 均能将大部分

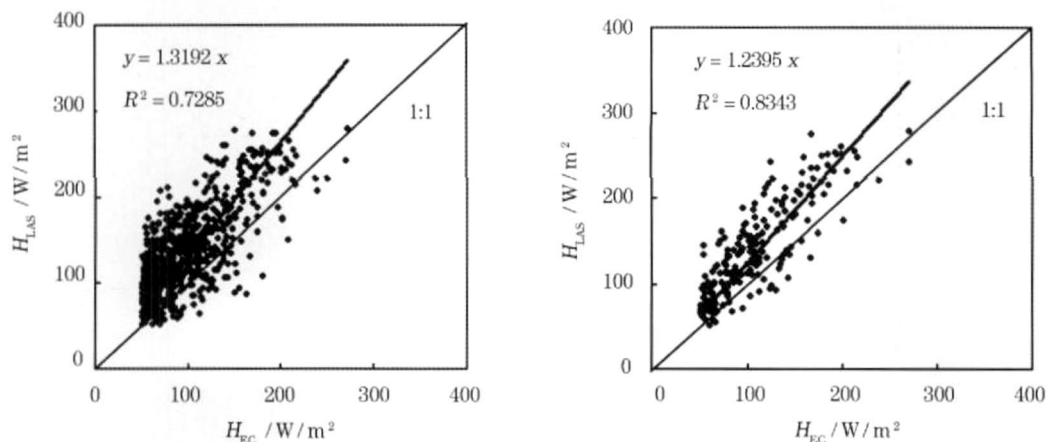


图 7 2008 年 4~9 月馆陶站 H_{LAS} 与 H_{EC} 的关系 (左: $0 < EBR < 1$, 右: $0.85 < EBR < 1$)

Fig. 7 Comparison of H_{LAS} between H_{LAS} and H_{EC} during April to September, 2008
(left: $0 < EBR < 1$, Right: $0.85 < EBR < 1$)

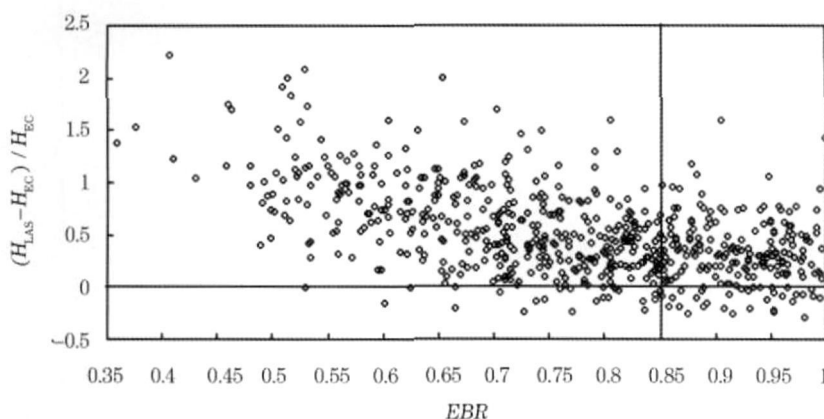


图 8 2008 年 4~9 月馆陶站能量闭合率 ($0 \sim 1$) 与 $(H_{LAS} - H_{EC}) / H_{EC}$ 之间的关系

Fig. 8 Comparison between Energy Balance Ratio (EBR) ($0 \sim 1$) and $(H_{LAS} - H_{EC}) / H_{EC}$ during April to September, 2008, Guantao site

地表覆盖, H_{LAS} 与 H_{EC} 的差异较其他时间段明显减小。但是由于该段时间内 EC 与 LAS 源区大小不同, 作物结构与长势各不相同, 且由于各地块的灌溉时间、次数与灌溉量等都存在差异, 引起观测场内的土壤水分状况并不一致, 地下 5 cm 处观测的土壤体积含水量在 20% ~ 30% 之间变化, 都可能导致两者之间仍然存在差异。

从上面的分析中可以看出, 即使在 EC 的能量闭合率相近的时期, H_{LAS} 和 H_{EC} 仍然存在差异。进一步利用馆陶站 2008 年 3 月 27 日、4 月 28 日、5 月 14 日和 8 月 18 日 11:00 (BST) 过境的 Landsat TM 5 数据来分析造成 H_{LAS} 与 H_{EC} 之间差异的原因。TM 过境时刻 LAS 与 EC 的通量源区可以分为重叠与非重叠 2 部分, 其中两者的源区重叠度是指分别对 EC 与 LAS 观测 80% 源区内的足迹函数值进行归一化

处理, 然后求取两者重叠部分足迹值的平均。非重叠部分地表温度均方差是指 EC 与 LAS 源区内两者不重叠部分的 Landsat TM 获取的地表温度的均方差。

从图 9 中可知, 所选 2008 年的 4 个卫星过境时刻, $(H_{LAS} - H_{EC}) / H_{EC}$ 的比值在 0.4 ~ 1.5 之间变化。4 个时次的能量闭合率都较为接近, 在 0.6 附近变化, 且 LAS 与 EC 源区的重叠程度也较为接近, 约为 60%。图中 H_{LAS} 与 H_{EC} 之间的差异与两者源区内非重叠部分的非均匀性的变化较为一致, 即地表温度的均方差越大, H_{LAS} 与 H_{EC} 之间的差异也越大。以 2008 年 3 月 27 日和 8 月 18 日为例, 2 个卫星过境时刻的能量闭合率分别为 0.64 和 0.61, 80% 源区内的重叠比例也均为 60%。由于 3 月下垫面主要为冬小麦和裸地, 而 8 月下垫面被玉米、棉花所覆

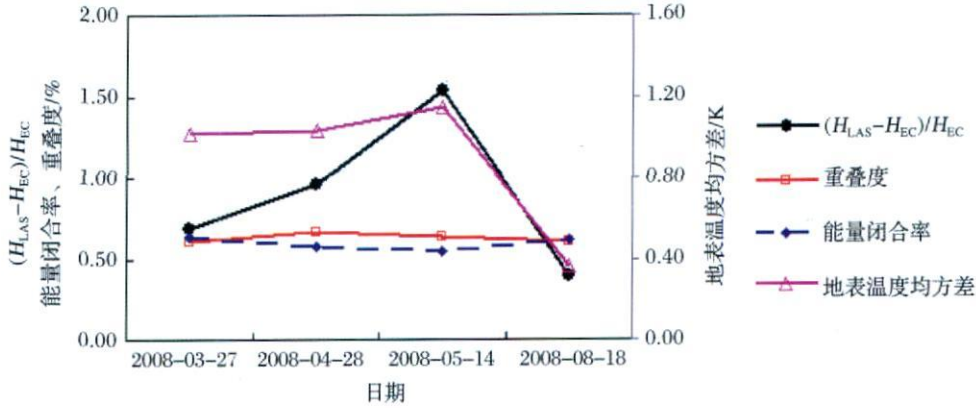


图 9 卫星过境日 LAS和 EC观测显热通量的差异与两者的源区重叠度、下垫面非均匀性、EC的能量闭合率的关系
Fig 9 The relationship between the difference of EC and LAS between the overlapping source area the heterogeneous surface as well as the energy closure ratio of EC on the satellite passing time

盖, 相对较为均一, 所以导致 80% 源区内非重叠区域地表温度的均方差相差较大, 分别为 1.02 和 0.37 K, 这与 2 个卫星过境时刻 H_{LAS} 与 H_{EC} 之间的差异是相一致的。而对于 2008 年 3 月 27 日和 4 月 28 日 2 个卫星过境时刻, 下垫面均为冬小麦与裸地的混合下垫面, 80% 源区内非重叠部分地表温度的均方差较为接近, 分别为 1.02 和 1.03 K, 但 2 个时刻涡动相关仪的能量闭合率 (分别为 0.64 和 0.58) 和两者源区重叠程度 (分别为 60% 和 66%) 都存在一定差异, 因此 2 个卫星过境时刻 H_{LAS} 与 H_{EC} 仍存在差异。对于 2008 年 5 月 14 日卫星过境时刻, 虽然其重叠程度与其他时刻的差异并不显著, 但是此时的能量闭合率在 4 个卫星过境时刻最低, 地表的非均匀性程度也最大, 这与 H_{LAS} 与 H_{EC} 之间的差异最大是一致的。

综上所述, 除涡动相关仪的能量闭合率外, 大孔径闪烁仪和涡动相关仪通量源区的重叠程度和下垫面的非均匀性等也是导致两者观测显热通量差异的原因。

4 结论与讨论

本文基于海河流域密云站、馆陶站和大兴站 2008—2009 年大孔径闪烁仪、涡动相关仪和自动气象站的同步观测数据, 首先对密云站、馆陶站和大兴站 1 月、7 月大孔径闪烁仪观测通量的源区分布以及源区内不同下垫面的通量贡献率进行了分析。其中密云站 LAS 源区呈东北—西南走向, 在长约 1 500 m, 宽约 400 m 的范围内, 源区内主要通量贡献源为园地和居民地。馆陶站 LAS 源区呈南北分布, 在长约 2 700 m, 宽约 800 m 的范围内, 棉花地和

冬小麦/玉米地对 LAS 观测显热通量的贡献率较大, 且相等。大兴站 LAS 源区呈东北—西南向, 分布在长约 2 000 m, 宽约 1 500 m 的范围内。同时, 3 个站点大孔径闪烁仪观测的显热通量表现出与净辐射一致的变化, 馆陶站各月 LAS 观测的显热通量明显小于密云站的同期数据; 大兴站显热通量的月平均日变化在 1 月、7 月与密云站较为接近。通过 2008—2009 年密云站、馆陶站、大兴站日平均显热通量的比较, 密云站日平均显热通量的季节变化呈单峰状, 较馆陶站和大兴站都偏大, 而馆陶站和大兴站的显热通量为三峰状, 这与源区内下垫面的植被类型和植被生长状况相一致。

最后以馆陶站 2008 年 LAS 与 EC 观测的显热通量为例分析了导致两者差异的原因。其中涡动相关仪的能量闭合率, 两者观测通量源区的重叠程度以及地表非均匀性等都是造成 H_{LAS} 和 H_{EC} 差异的主要影响因素。本文对馆陶站 2008 年生长季节 LAS 与 EC 观测显热通量的差异分析中所用样本点较少, 还需要结合更多高分辨率遥感数据 (如 TM、ASTER 数据) 进行更为详细的分析。

参考文献 (References):

[1] De Bruin H A R, Van Den Hurk B J J M, Koshiek W. The scintillation method tested over a dry vineyard area[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1995, 76: 25-40.
[2] McAneney K J, Green A E, A still M S. Large-aperture scintillimetry: The homogeneous case[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1995, 76: 149-162.
[3] Anandakumar K. Sensible heat flux over a wheat canopy: Optical scintillimeter measurements and surface renewal analysis estimations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 96: 145-156.

- [4] Cain J D, Rosier P T W, Meijninger W, *et al*. Spatially averaged sensible heat fluxes measured over barley [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 307-322.
- [5] Hoedjes J C B, Zuurbier R M, Watt C J. Large aperture scintillometer used over a homogeneous irrigated area partly affected by regional advection [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 99-117.
- [6] Xu Z W, Liu S M, Wang W Z, *et al*. Evapotranspiration measurements over different surfaces in the Heihe river basin, China [C] // *Biohydrology of Farmland under Desertification*. Japan: SPA & Water Press, 2010: 86-106.
- [7] Meijninger W M L, Hartogensis O K, Kohsiek W. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 37-62.
- [8] Chebouni A, Watts C, Lagouarde J P. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 215-226.
- [9] Ezzahar J, Chebouni A, Er-raki S, *et al*. Combining a large aperture scintillometer and estimates of available energy to derive evapotranspiration over several agricultural fields in a semi-arid region [J]. *Plant Biosystems*, 2009, 143(1): 209-221.
- [10] Kanda M, Moriwaki R, Roth M, *et al*. Area-averaged sensible heat flux and a new method to determine zero-plane displacement length over an urban surface using scintillimetry [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2002, 105: 177-193.
- [11] Roth M, Samson J A, Satyanarayana A N V. Methodological consideration regarding the measurement of turbulent fluxes in the urban roughness sublayer: The role of scintillimetry [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2006, 121: 351-375.
- [12] Lagouarde J P, Irvine M, Bonnefond J M, *et al*. Monitoring the sensible heat flux over urban areas using large aperture scintillimetry: Case study of Marseille city during the ESCOMPTE experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118: 449-476.
- [13] Moene A F, De Bruin H A R. Sensible heat flux data derived from the scintillimeters [C] // Su Z, Jacobs C, eds. *BCRS Report: Advanced Earth Observation Land Surface Climate*. Final Report, 01-02, 2001: 85-90.
- [14] 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: 85-97.
- [15] Schottmeyer D, Moene A F, Holtslag A A M, *et al*. Surface fluxes and characteristics of drying semi-arid terrain in west Africa [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 118: 583-612.
- [16] Lagouarde J P, Jacob F, Gu X F, *et al*. Spatialization of sensible heat flux over a heterogeneous landscape [J]. *Agronomie*, 2003, 22: 627-633.
- [17] Kleissl J, Hong S H, Hendrickx J M H. New Mexico scintillometer network in supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models [J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 2009, 90(2): 207.
- [18] Lu L J, Liu Shaomin, Xu Z W, *et al*. Results from measurements of large aperture scintillometer over different surfaces [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(2): 171-178 [卢俐, 刘绍民, 徐自为, 等. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析 [J]. *应用气象学报*, 20(2): 171-178].
- [19] Bai Jie, Liu Shaomin, Ding Xiaoping, *et al*. A study of the processing method of large aperture scintillometer observation data [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 148-165 [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): 148-165].
- [20] Ochs G R, Wilson J J. A second-generation large aperture scintillometer [Z]. NOAA Tech. Memor. ERL-ETL-232, NOAA Environmental Research Laboratories, Boulder, CO, USA, 1993: 24.
- [21] Liu Shaomin, Lu L, Mao D, *et al*. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 769-783.
- [22] Brutsaert W. *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications* [M]. Reidel Publishing Company, 1982.
- [23] Yang K, Koike T, Yang D. Surface flux parameterization in the Tibetan plateau [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 116: 245-262.
- [24] Xu Z W, Liu Shaomin, Gong Lijuan, *et al*. A study of 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.]
- [25] Qin Zhifeng, Zhang Minghua, Mon Kameli, *et al*. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466 [覃志豪, Zhang Minghua, Mon Kameli 等. 用陆地卫星 TM 6 数据演算地表温度单窗算法 [J]. *地理学报*, 2001, 56(4): 456-466].
- [26] Peng Guoliang, Cai Xuhui, Liu Shaomin. A flux footprint model for large aperture scintillometer [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(6): 822-827. [彭谷亮, 蔡旭晖, 刘绍民. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用 [J]. *北京大学学报*, 2007, 43(6): 822-827.]
- [27] Shuang Xi. Investigation on Spatial Representativeness of Surface Flux Measurements: Taking Eddy Covariance system and Large Aperture Scintillometer for Example [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2009. [双喜. 通量空间代表性的研究——以涡动相关仪和大孔径闪烁仪为例 [D]. 北京: 北京师范大学, 2009.]
- [28] Komann R, Meixner F X. An analytic footprint model for neutral stratification [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.

Temporal-spatial Characteristics Analysis of Area-averaged Sensible Heat Fluxes by Large Aperture Scintillometer over Hai River Basin

BAI Jie, LU Shaomin, DING Xiaoping

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Combined with the measurements of Eddy Covariance (EC) system and Automatic Weather Station (AWS) and after a series steps including data screening, quality assessment, data processing and gap filling, the sensible heat fluxes of Large Aperture Scintillometer (LAS) H_{LAS} and evapotranspiration (ET) were calculated based on the LAS measurements in Miyun, Guantao and Daxing sites over Hai River Basin during 2008–2009. The spatial representation and flux contribution of different land use under unstable conditions were analyzed in January and July over Miyun, Guantao and Daxing sites. Combined with the footprint and the crop phenological phase, the seasonal variation of H_{LAS} over the three sites were compared with R_n in the same period, where Guantao site had the lowest value each month, H_{LAS} in Miyun and Daxing were closed in January and July. Meanwhile, daily H_{LAS} between 9:00 and 15:00 were discussed over the three sites from 2008–2009. Compared to the single peak variation of Miyun site, both Guantao and Daxing sites both had three peak values because of the alternation of crops. Finally, according to the energy closure ratio of EC measurement, the different footprint overlapping ratio between LAS and EC measurements, as well as surface heterogeneity of their non-overlap source area, the difference between H_{LAS} and H_{EC} in Guantao site was discussed.

Key words Large Aperture Scintillometer; Sensible heat fluxes; Hai River Basin; Temporal-spatial characteristics analysis

《地球科学进展》“IODP 研究”专栏征稿启事

2004 年 4 月,我国以“参与成员”的身份加入 IODP,这对于我国地球科学研究早日整体上进入国际前沿、造就一批勇于承担推动地球科学发展重任的中国科学家来说,是一次难得的机遇。

为了推动我国在 IODP 研究中发挥更大的作用,展示国内学术界参与 ODP 及 IODP 相关研究所取得的科学成果,中国 IODP 办公室与《地球科学进展》达成协议,合作开辟“IODP 研究”专栏,目前已刊出多篇相关论文。

该专栏由中国 IODP 办公室负责组稿,并组织专家审稿,论文通过审稿后将以最快速度在《地球科学进展》上刊载。同时,中国 IODP 办公室为专栏论文支付出版补贴(版面费)。

欢迎国内从事相关研究的广大科研人员踊跃投稿,来稿应具有科学性、创新性,与 ODP/IODP 相关的研究性论文和综述论文均可,请参照《地球科学进展》杂志格式要求撰写。

有关投稿事宜请联系中国 IODP 办公室 (<http://www.iodp-china.org>),本启事长期有效。

地址:上海市四平路 1239 号同济大学海洋地质国家重点实验室 邮政编码:200092

联系人:拓守廷 电话:021-65982198 E-mail: iodp_china@tongji.edu.cn

中国 IODP 办公室