

文章编号: 1001-8166(2010)11-1113-15

大尺度地表水热通量的观测、分析与应用

刘绍民¹, 李小文¹, 施生锦², 徐自为¹, 白洁¹,
晓萍¹, 贾贞贞¹, 朱明佳¹

(1 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;

2 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 大尺度地表水热通量的观测对实现地面台站观测通量的空间尺度扩展, 验证水文模型、数值天气与气候预报模式以及检验遥感监测产品等意义重大。以闪烁仪为例, 从测量仪器与观测试验、观测数据的处理与分析、观测数据的应用等方面论述了大尺度地表水热通量的国内外研究进展, 并对其发展前景进行了展望。

关键词: 大尺度; 地表水热通量; 闪烁仪

中图分类号: P404 **文献标志码:** A

1 引言

随着对全球气候变化、流域水资源管理等热点问题的日益关注, 地表水热通量的研究尺度逐渐从传统的点或斑块尺度转向区域或全球尺度。大尺度地表水热通量的研究是大气科学、地理学、水文学、生态环境学等领域共同关注的热点。目前大尺度地表水热通量的获取方法主要包括: 遥感估算、模式模拟与观测。

20 世纪 70 年代以来, 随着遥感技术的不断发展, 出现了利用遥感信息估算大尺度地表水热通量的方法, 为非均匀下垫面上大尺度地表水热通量的监测带来了希望。遥感技术的实时性、区域性等特点, 使其在大尺度地表水热通量监测方面具有明显的优越性, 但该技术目前还存在一定的局限性, 如遥感数据和遥感监测模型的选择与适用性、地表参数反演的不确定性、时空尺度扩展的影响、平流对遥感方法的影响、非遥感参数的估算精度等^[1-3]。因此, 遥感估算的大尺度水热通量急需用地面观测值来验证。

近 20 年来数值模式飞速发展, 已能够模拟大尺度上土壤—植被—大气连续体中能量和水分的变化过程。但该类模式在应用时往往受到多种因素的制约, 如需要众多的地表参数(土壤质地、植被覆盖等)、模式对通量的动力学特征描述不够完善^[4,5]、陆地表面的空间异质性^[6,7]、需要高精度与高时空分辨率的大气强迫数据等。所以数值模式也需要利用地面观测值进行检验与校正。

迄今为止, 在非均匀下垫面和地形起伏的复杂下垫面上, 长期的大尺度(一般指 1~10 km 尺度)地表通量的观测仍然非常困难。目前地面台站利用涡动相关仪(Eddy Covariance system, EC)、波文比—能量平衡装置、空气动力学方法等仪器测量的地表水热通量是单点或斑块尺度, 其空间尺度通常只有几十至几百米。尽管已在多个国际大型陆面过程试验以及当前各种研究中得到广泛应用^[8], 但这些传统地面观测台站均存在观测尺度有待扩展等问题。

当前, 大尺度地表水热通量的观测方法主要涉及以下 3 种: 涡动相关仪的观测矩阵、机载涡动相关

收稿日期: 2010-09-13 修回日期: 2010-09-28

* 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)和“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: 刘绍民(1967-), 男, 浙江绍兴人, 教授, 主要从事大尺度地表通量观测与遥感应用研究。E-mail: sm.li@bnu.edu.cn

仪以及闪烁仪。其中涡动相关仪的观测矩阵是指在非均匀下垫面上构建由多套涡动相关仪组成的观测网,依据各种土地利用覆盖类型上的单点观测值,通过一定的转换方法得到大尺度的平均通量值,即聚合方法 (aggregation)^[9-11]。主要包括:基于不同土地利用覆盖类型面积比例的加权平均方法,以及结合通量贡献源区内相对权重值的加权平均方法等。但该方法忽略了相邻下垫面之间的相互作用,在复杂下垫面上应用还存在一定的局限性。另外,该方法需要投入大量的人力和物力,并且无法涵盖所有的土地利用覆盖类型,因而也很难实现大范围的应用。

自 20 世纪 80 年代以来,机载涡动相关仪已经被证明是测量大尺度(一般为几百平方公里范围)、瞬时水热通量的一个有效方法^[12-13]。但从许多观测结果的比较中可发现:机载涡动相关仪观测的显热通量比地面涡动相关仪观测值偏低 10%~50%,而潜热通量并不确定,有时偏高,有时偏低。主要原因归结为:采集频率较低、飞行路径较短以及通量随高度的辐散等^[14]。

闪烁仪可以测量 1~10 km 光径路线上的平均地表通量。其中大孔径闪烁仪 (Large Aperture Scintillometer LAS) 与无线电波闪烁仪 (Radio Wave Scintillometer RWS) 的光径长度为 1~5 km,超大孔径闪烁仪 (eXtra Large Aperture Scintillometer XLAS) 的光径长度可达 5~10 km,而小孔径型光学闪烁仪 (Small Aperture Scintillometer SAS) 的光径长度则为 50~250 m 左右。光学的闪烁仪(可见光与近红外波段)能直接测量显热通量,并通过能量平衡方程余项法推算出潜热通量,而结合无线电波闪烁仪可直接测量潜热通量。尽管闪烁仪的观测目前仍受到天气条件(降水、低的能见度与弱湍流)和方法本身(信号的饱和、信号对内尺度的依赖、架设塔的晃动)的限制^[15],但闪烁仪已经得到了广泛应用,成为观测大尺度动量、热量与水汽通量的有效方法。在我国,目前至少有近 30 个固定、半固定的闪烁仪观测站点正在运行。

当前,国内所用的闪烁仪全部依赖国外进口。由于观测仪器需长期在严酷的野外工作环境中使用,导致仪器的使用和更新周期相对较短。在实施科学观测的过程中,除需不断花费大量的外汇资源购置外,在仪器的使用和维护过程中还存在许多不便之处,这一现状已严重地阻碍和制约了我国相关科学领域的研究需要和原始创新能力的形成。在上

述背景下,北京师范大学的李小文和刘绍民申请了公益性行业(气象)科研专项经费项目“大尺度水热通量观测系统的研制与应用研究”,在 2007 年 10 月获批准并正式启动。该项目的目标为:开展理论可行、技术先进、观测范围可达 5 km 的水热通量观测系统的研制、调试与实际应用,打破目前地表通量测量仪器基本依赖进口又无法满足实际需求的局面。一方面实现台站观测通量的尺度扩展,另一方面满足卫星遥感产品的地面验证需求。研究内容是:①大尺度水热通量测量系统的硬件部分研制;②大尺度水热通量测量系统的软件部分研究;③大尺度水热通量测量系统的调试与检验;④大尺度水热通量测量系统的实际应用,开展台站观测通量的尺度扩展与卫星遥感产品的地面验证。经北京师范大学、中国科学院遥感应用研究所、中国农业大学、中国林业科学研究院林业研究所、国家卫星气象中心以及中国科学院地理科学与资源研究所等单位 3 年的攻关,已经研发成功了大尺度水热通量观测系统,加工了 3 台样机,申请了国家发明专利,研制了观测数据的处理与分析软件,并开展了观测大尺度地表水热通量的应用示范。本专辑的论文基本上是在该项目资助下完成的。

本文以闪烁仪为例,从测量仪器与观测试验、观测数据的处理与分析、观测数据的应用等方面阐述了大尺度地表水热通量的研究进展,并对今后的发展前景进行了展望。

2 大尺度地表水热通量的观测

2.1 大尺度地表水热通量的测量仪器

当前,闪烁仪的主要生产商为荷兰 Kipp & Zonen 公司(2003 年前为瓦赫宁根大学生产;型号有:LAS, XLAS)和德国 Scintec 公司(型号有: BLS45Q, 90Q, 2000 与 SLS2Q, 20-A, 4Q, 40-A),均生产光学型闪烁仪。荷兰和德国生产的闪烁仪均包括发射装置和接收装置,野外观测时需配备蓄电池(或变压器)、太阳能板(或交流电)等设备(荷兰闪烁仪还需配备数据采集器)。其中荷兰闪烁仪的发射器发射单一连续点光源(880 nm,最大光功率为 80 mW),功率较小,在能见度比较低或光径路线比较长时无法有效运行,而且野外观测时发射器和接收器必须进行准确的对准校正。德国闪烁仪的发射器发射面脉冲光源(880 nm,脉冲频率分为 1、5、25、125 Hz),光源功率大,发光均匀,发射角为 16°,观测时不需要准确对准校正。但是其接收装置耗电量较大(如 BLS450

的接收器功率高达 15W, 包括数据处理单元), 在野外观测无交流电并采用太阳能板供电时, 如果出现连续阴雨天, 容易因电量不足造成数据缺失。不同的大孔径闪烁仪在观测时存在一定的差异。据 K leiss 等^[16 17] 研究, 荷兰 Kipp&Zonen 公司生产的同型号大孔径闪烁仪观测显热通量之间的回归斜率差异最大可达 21%, 一般为 6%; 德国 Scintec 公司生产的同型号大孔径闪烁仪观测显热通量之间的回归斜率差异为 3% 或更小些, 而且荷兰大孔径闪烁仪观测的显热通量一般比德国大孔径闪烁仪大 20% 以上。2007 年 10 月 28 日至 11 月 28 日在北京密云站, 将德国大孔径闪烁仪 (BLS450) 与荷兰大孔径闪烁仪 (LAS) 进行了对比观测。期间 2 种大孔径闪烁仪的发射器与接收器架设在同一位置, 使它们具有相同的光径长度与有效高度。并将德国大孔径闪烁仪的发射器与荷兰大孔径闪烁仪的接收器放在一起, 使两者发射光束方向相反, 避免了 2 台大孔径闪烁仪之间信号的相互干扰。图 1 为德国 BLS450 与荷兰大孔径闪烁仪测量显热通量的比较 (2007. 10. 28~ 11. 05), 图中的数据均为白天不稳定条件下显热通量大于 50 W/m^2 的数据。从图 1 可以看出, 荷兰大孔径闪烁仪观测的显热通量比德国 BLS450 的观测值大 17% 左右, 两者的相关系数平方 (R^2) 为 0.94 (样本数 $N = 83$)。

基于闪烁理论、孔径平均效应及莫宁—奥布霍夫相似理论, 于 2009 年在国内首次成功研制了大尺

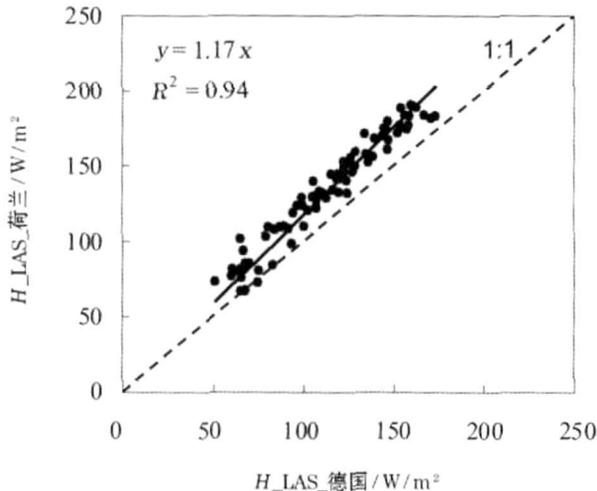


图 1 北京密云站德国 BLS450 与荷兰 LAS 测量显热通量的比较 ($H_{LAS} > 50 \text{ W/m}^2$, 2007 10 28~ 11 05)

Fig 1 Comparison of sensible heat fluxes measured by different scintillometers under unstable condition at Miyun site ($H_{LAS} > 50 \text{ W/m}^2$, 2007 10 28~ 11 05)

度水热通量观测系统。该系统主要由发射器、接收器、云台、瞄准器、气象要素传感器、数据采集器、远程无线数据传输模块、太阳能供电系统、数据处理软件等部分组成。其中发射器平均功耗 3W, 接收器功耗 1.8W, 耗电量比德国 BLS450 和荷兰大孔径闪烁仪更小。发射器光源功率为 100 mW, 比荷兰大孔径闪烁仪的 80 mW 更强。为了检验该观测系统的稳定性与准确性^[18], 将研制的 3 台样机在不同气候与土地利用覆盖类型的北京密云站 (2009. 02 15 ~ 04. 30, 06 23~ 07. 09)、青海阿柔站 (2009. 07. 14 ~)、河南济源站 (2010 02 03~ 08 06) 与河北馆陶站 (2010 05. 26~ 07. 28) 进行了野外比对。图 2 为研制的大尺度水热通量观测系统与德国大孔径闪烁仪 (BLS450) 测量显热通量的比较 (2009 12 15~ 2010 05 26), 图中选用了显热通量大于 50 W/m^2 的数据。从图 2 可以看出, 研制的大尺度水热通量观测系统测量显热通量比德国 BLS450 的观测值偏大 17%, R^2 达 0.89 (样本数 $N = 1 688$)。

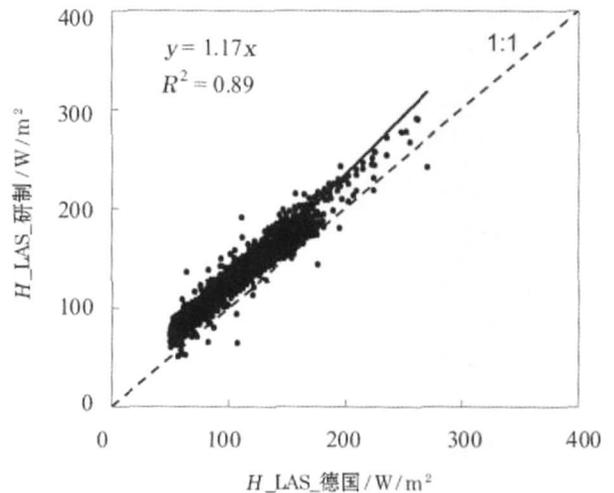


图 2 青海阿柔站研制的大尺度水热通量观测系统与德国 BLS450 测量显热通量的比较 ($H_{LAS} > 50 \text{ W/m}^2$, 2009 12 15~ 2010 05 26)

Fig 2 Comparison of sensible heat fluxes measured by a developed measuring system and Germany LAS (BLS450) under unstable condition at Arrou site ($H_{LAS} > 50 \text{ W/m}^2$, 2009 12 15~ 2010 05 26)

2.2 大尺度地表水热通量的观测试验

在国外, 闪烁仪已被成功地应用于各种均匀与非均匀下垫面上大尺度地表水热通量的观测试验中^[19~ 35] (表 1)。其中以 Flevo land (Netherlands)、LITFASS-98 (Germany)、LITFASS-2003 (Germany) 等试验最具代表性。K leiss 等^[19] 在美国新墨西哥洲

表 1 国外主要的大尺度地表水热通量观测试验

Table 1 The main observation experiments overseas for surface energy and water vapor fluxes at large scale

试验名称	试验时间	地点	土地利用 / 覆盖类型	闪烁仪型号	有效高度 /m	光径长度 /m	参考文献
SALSA	1997—1998	墨西哥	草地	瓦赫宁根大学	--	300/600/ 850(3次 试验)	[20]
Flevoland	1998	荷兰	农田	瓦赫宁根大学 (LAS) / 艾恩德霍芬 科技大学 (RWS)	LAS 11.6 RWS 10.9	2 200	[21]
Turkey	1998	土耳其	葡萄、棉花、果树	瓦赫宁根大学	18	2 700	[22]
LIFPASS-98	1998	德国	森林、农田等混合下 垫面	瓦赫宁根大学	45	4 700	[23]
CASES-99	1999	美国	草地、农田	瓦赫宁根大学 (LAS) / Scintec 公司 (DBSA S)	LAS 3.4/5.17 (T/R) DBSA S 2.45	LAS 420 DBSA S 112	[24]
Spain	1999	西班牙 (Leida)	园地、苜蓿地	瓦赫宁根大学	41.2	4 440	[25]
		西班牙 (Tomelloso)	葡萄园	瓦赫宁根大学	4.35	1 070	
		西班牙 (Badajoz)	农田	瓦赫宁根大学	51.3	5 250	
Sri Lanka	1999—2000	斯里兰卡	多年生作物、季节性 水稻、草地	瓦赫宁根大学	83	1 900	[26]
BSK-ME2 Scintillimeter network	2005—	荷兰 (Haarweg)	草地	瓦赫宁根大学	4	347	http://www. met.wau.nl
	2005—	荷兰 (MaasWaal)	森林、草地、耕地	瓦赫宁根大学	34	5 065	
	2006—	荷兰 (Lutjewad)	耕地	Kipp&Zonen公司	25	1 807	
		荷兰 (Speuld)	混合森林	Kipp&Zonen公司	40	1 748	
Yaqui	2000	墨西哥	农田	瓦赫宁根大学	3.4	758	[27]
Cabauw	2000	荷兰	草地	瓦赫宁根大学	39.5/46.5(T/R)	9 800	[28]
SUDMED and IRRMED	2002	摩洛哥	橄榄园	瓦赫宁根大学	13	1 070	[29]
GLOWA- Voka	2001—2003	加纳 (Ejura)	果树、灌木等混合下 垫面	瓦赫宁根大学	30.1	2 030	[30]
		加纳 (Tanake)	疏林草地		19.5	2 420	
LIFPASS- 2003	2003	德国	森林、农田、草地等混 合下垫面	瓦赫宁根大学	LAS/RWS 43.3	LAS/RWS 4 700	[31]
					XIAS 69.7	XIAS 10 200	[32]
NMTLASNet	2006—	美国新墨西哥州 (SNWR)	(均一、干旱) 草地	Kipp&Zonen公司	31.5	2 398	[19]
		美国新墨西哥州 (SAR)	(非均一) 沼泽地		44.8	3 087	
		美国新墨西哥州 (EMRTC)	(均一、干旱) 灌木丛		62.9	3 388	
		美国新墨西哥州 (VCNP)	(山区、均一) 草地		42.6	2 003	
		美国新墨西哥州 (MRO)	(山区、非均一) 草地		17.6	606	
		美国新墨西哥州 (EMNM)	(均一) 熔岩地		59.8	2 941	
		美国新墨西哥州 (SAA)	(均一) 苜蓿地		20.0	1 732	
NPA	2005	巴西	热带雨林	Kipp&Zonen公司	54.1	1 140	[33]
AMMA	2006	尼日尔	农田、裸地、退化的灌木	瓦赫宁根大学	--	3 200	[34]
		贝宁	森林、灌木、农田	Scintec公司	--	2 400	[35]

说明: Flevoland 试验中所用闪烁仪包括: 大孔径闪烁仪 (LAS) 和无线电波闪烁仪 (RWS); CASES-99 试验中所用闪烁仪包括: LAS 和小孔径闪烁仪 (Displaced-Beam Small Aperture Scintillimeter DBSA S); Cabauw 试验所用闪烁仪为超大孔径闪烁仪 (XLAS); LIFPASS-2003 试验中所用闪烁仪包括: LAS/RWS 以及 XIAS; 其他试验所用闪烁仪均为 LAS

建立了由 7 台大孔径闪烁仪组成的观测网, 用于遥感模型、水文模式与数值天气模式的校正与验证。

在国内, 中荷合作项目“中国能量与水平衡监测系统”项目于 2000 年分别在四川乐至、甘肃民勤、吉林乾安、湖南桃江和河南郑州 5 个地点安装了大孔径闪烁仪。2005 年的中荷合作项目“基于卫星的黄河流域水监测与河流预报系统”在河源区兴海、玛沁、唐克与泾河流域的泾川设立了大孔径闪烁仪观测站点。目前在我国的海河流域(北京密云与大兴、河北馆陶以及山东禹城站等), 黄河流域(青海兴海与玛沁、四川唐克、甘肃泾川、兰州大学榆中与玛曲、山东位山以及河南济源站等), 黑河流域(青海阿柔站)以及青藏高原(西藏那曲与珠峰站等)等地已经建立了近 30 个大孔径闪烁仪的观测站。

北京师范大学刘绍民研究小组自 2002 年起, 依托国家“973”项目、全球环境基金项目以及欧盟项目等支持, 在地处我国不同气候带(海河流域、黑河流域、青藏高原与鄱阳湖流域等)的密云、馆陶、大兴、阿柔、那曲 BJ 以及昌平小汤山、临泽草地、千烟洲等站开展了长期与短期的卫星像元尺度地表水热通量的观测, 首次在国内初步建立了卫星像元尺度地表水热通量的地面观测站网(表 2), 所涉及

的下垫面包括农田、草地、林地等, 为相关遥感估算模型与数值模式的发展与验证以及地面台站传统测量的单点或斑块尺度地表水热通量的空间尺度扩展奠定了数据基础。其中卫星像元尺度水热通量的观测系统由大孔径闪烁仪、涡动相关仪和自动气象站(Automatic Weather Station, AWS)构成, 并结合大孔径闪烁仪和涡动相关仪的足迹(footprint)模型, 通过观测通量的空间代表性分析, 可以获得不同卫星像元尺度(如 MODIS、TM/ASTER 等)的地表水热通量^[36]。并且从大孔径闪烁仪观测场地的选取、仪器的安装与调试、观测数据的采集及仪器的维护等方面出发, 建立了一套大孔径闪烁仪的观测方法^[37]。

3 大尺度地表水热通量观测数据的处理与分析

3.1 观测数据的处理与质量控制

观测过程中有许多不确定性, 存在着测量误差, 如仪器误差、方法误差、环境误差和测量人员操作误差等。为了确保观测数据的准确性, 对大孔径闪烁仪观测数据进行处理并实施严格的质量控制是非常有必要的。大孔径闪烁仪观测显热、潜热通量的精度一方面取决于观测的原始数据质量(空气折射指

表 2 卫星像元尺度地表通量观测网的站点概况

Table 2 Overview of the network of surface energy and water vapor fluxes observations at satellite pixel scale

观测站	密云 (MY)	馆陶 (GT)	大兴 (DX)	阿柔 (AR)	那曲 BJ (NQ)	昌平小汤山* (XTS)	临泽 (LZ)	千烟洲 (QYZ)
纬度	40° 37' 51"	36° 30' 54"	39° 37' 17"	38° 02' 40"	31° 22' 07"	40° 10' 56"	39° 14' 35"	26° 44' 45"
经度	117° 19' 24"	115° 07' 39"	116° 25' 37"	100° 27' 53"	91° 53' 55"	116° 26' 53"	100° 03' 40"	115° 04' 04"
海拔高度 /m	350	30	20	3 033	4 505	38	1 384	102
观测仪器	LAS (Kipp&Zonen LAS)、EC、AWS	LAS (Kipp& Zonen LAS)、 EC、AWS	LAS (Kipp&Zonen LAS)、EC、 AWS	LAS (Scintec, BLS450)、 EC、AWS	LAS (Scintec, BLS450)、 EC、AWS	LAS (瓦赫宁根 大学, LAS150)、 EC、AWS	LAS (Kipp& Zonen LAS)、 EC、AWS	LAS (Scintec, BLS450)、 EC、AWS
土地利用 / 覆盖类型	果树、玉米地 / 裸地、居民地	冬小麦 压 米、棉花	冬小麦/玉米、 瓜果、蔬菜	草地	草地	玉米地、杂 草地、裸地	草地	水稻田
观测时间	2006 08~	2007. 08~	2008 05~	2008 03~	2009 07~	2002 03 26~ 08. 18 2004 05 27~ 07. 07 2005 05 01~ 06. 10	2008 05 19~ 08 31	2005 10 15~ 10 31
EC 架高 /m	26 66	15 6	3 0	3 15	3	2002 2 2004 S 1 8 N: 1 9 2 5 2005 S 1 9 N: 2 0		1 8
LAS 有效 高度 /m	35 86	15 6	29 6	9 5	8 6	2002 4 2004/2005 8	9 2	10
LAS 光径 长度 /m	2 420	2 760	2 480	2 390	1 560	2002 940 2004/2005 1 000	1 550	450
配套参数	空气温湿度、风速、风向、降水量、气压、辐射(总辐射、反射辐射、向上与向下长波辐射)、地表辐射温度、土壤热通量、多层土壤温度和湿度							

* 小汤山试验场 2004/2005 年有南(S)、北(N) 2 个观测点

数的结构参数 C_n^2), 另一方面取决于由 C_n^2 到大气的温度结构参数 C_T^2 、显热通量与潜热通量等计算过程引入的误差。

在对观测的 C_n^2 的筛选中, 需要剔除降雨、闪烁强度饱和、信号强度较弱以及夜间弱湍流时刻的数据。由于大孔径闪烁仪测量显热通量是基于莫宁—奥布霍夫的相似理论, 因此可以结合涡动相关仪和自动气象站的观测数据, 将不同稳定度状况下大孔径闪烁仪获取的 C_T^2 与基于莫宁—奥布霍夫相似理论的理论值进行比较, 以检验相似理论的适用性。图 3 为 2009 年密云、馆陶、阿柔 (1~6 月) 与那曲 (8~10 月) 站在大气不稳定状态下的大孔径闪烁仪观测值 ($C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3} T_*^2$ 与 $(Z_{LAS} - d) L_{MO}$), 其中 Z_{LAS} 、 d 分别为大孔径闪烁仪的有效高度和零平面位移, T_* 、 L_{MO} 分别为涡动相关仪测量的温度尺度和莫宁—奥布霍夫长度) 与 De Bruin (1993)^[38]、Andreas (1988)^[39]、Thiemann 等 (1992)^[40] 等函数值之间的关系 (显热通量大于 50 W m^{-2})。从图 3 可以看出: 那曲与阿柔站的观测值集中分布在经验函数线的周围; 馆陶站观测值大部分集中在经验函数线周围, 但在近中性情况下有一些偏高; 而密云站观测值多数比经验函数值偏高, 且在近中性情况下愈明显。这些与下垫面的平坦和均匀程度等有关。

在由 C_n^2 到潜热通量的计算过程中, 有效高度与光径长度的计算、湿度订正、地表粗糙度与风速的测定、大气稳定度的判断与稳定函数的选择、源区内平均的净辐射与土壤热通量的估算等是容易引入误差的环节。Hartogensis 等^[41] 估算了各项观测误差对显热通量计算结果的影响: 有效高度可达 67%, 光径长度为 14%, 波文比 (湿度订正) 是 8%, 但波文比较小时, 影响将增大。风速与地表粗糙度的影响分别为 6% 与 4%, 但在中性层结条件下影响将大一些。大气稳定度函数的选择也是误差的主要来源。据 Odhianbo 等^[42] 的研究, 对于小孔径闪烁仪, 选用不同的稳定度函数 (De Bruin (1993)、Edson and Fairall (1998)、Hill (1992)、Thiemann (1990)、Wesely (1976)、Wyngaard (1971)), 显热通量的估算差异在 $\pm 20\%$ 左右。

卢俐等^[43] 利用北京小汤山 2002 年、2004 年与密云 2007 年的观测数据, 研究了波文比系数、风速与气温、有效高度、地表粗糙度与零平面位移高度以及稳定度函数对大孔径闪烁仪观测显热通量的影响, 探讨了数据处理中大气稳定度的判断方法。在此基础上, 白洁等^[44] 以海河流域 2008 年密云和馆

陶站大孔径闪烁仪的观测数据为例, 研究了观测数据的筛选、 C_n^2 的计算、湿度订正、大气稳定度判断与普适函数的选取、有效高度的计算, 以及不同时间尺度缺失数据的插补与冬季蒸散量的推算方法等, 并在国内首次建立了一套较为完整的大孔径闪烁仪观测数据的处理流程, 涵盖观测数据的筛选、处理与插补, 适用于荷兰 Kipp & Zonen 与德国 Scintec 公司的大孔径闪烁仪以及研制的大尺度水热通量观测系统。

3.2 观测数据的分析

大孔径闪烁仪观测数据的分析包括观测通量的空间代表性与时间变化特征 (日、季节、年际) 的分析等。

观测通量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的状况, 可用足迹函数来表征, 与仪器架高、大气状况 (稳定度、风速、风向等) 以及下垫面粗糙度等因素有关。2002 年 Meijninger^[21] 将足迹应用到了大孔径闪烁仪观测数据的分析中, 通过结合 Horst 等^[45] 提出的足迹模型与大孔径闪烁仪的空间权重函数, 得到了适用于大孔径闪烁仪线状观测的足迹模型。彭谷亮等^[46] 依据 Komann 等^[47] 的解析模型结合空间权重函数在国内首次建立了大孔径闪烁仪的足迹模型。宫丽娟等^[48]、双喜等^[49]、郑宁等^[50] 分别计算与分析了北京密云站、黑河流域阿柔与兰大草地站、河南济源站大孔径闪烁仪观测通量的源区。蔡旭晖等^[51] 利用 2008 年密云站的观测数据, 分析了非均匀下垫面上大孔径闪烁仪源区的影响因子, 并探讨了气候学足迹的计算方法。图 4 为 2009 年密云、馆陶、阿柔与那曲站 1 月、7 月的大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测通量的 80% 源区分布图 (其中那曲站为 8 月、10 月; 密云站为 50% 源区)。从图 4 可知: 密云与阿柔站大孔径闪烁仪的源区为东北—西南向, 馆陶站大孔径闪烁仪的源区呈南—北向, 那曲站大孔径闪烁仪的源区为西北—东南向。密云、馆陶、阿柔与那曲站大孔径闪烁仪通量贡献源区的范围分别为: $1\ 600 \text{ m} \times 320 \text{ m}$ 、 $2\ 500 \text{ m} \times 640 \text{ m}$ 、 $2\ 000 \text{ m} \times 630 \text{ m}$ 、 $1\ 450 \text{ m} \times 750 \text{ m}$ 。

Beyrich 等^[23]、Hemakumara 等^[26]、Schitteneyer 等^[30]、Ezzahar 等^[52] 分别利用大孔径闪烁仪在森林与农田等混合、多年生作物与季节性水稻等混合、果树与灌木等混合以及疏林草地、橄榄园等多种非均匀下垫面上观测了大尺度显热通量与潜热通量, 并对其日、季节变化特征进行了分析。在国内, 支克

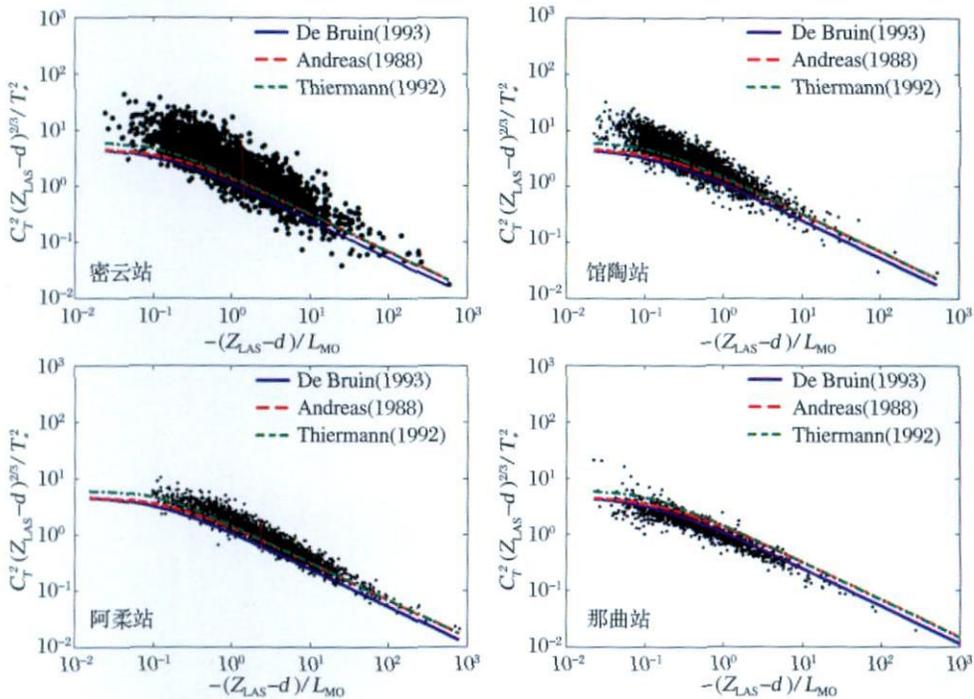


图 3 2009 年密云、馆陶、阿柔 (1~ 6 月)、那曲 (8~ 10 月) 站在大气不稳定状态下的观测值 $(C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3} / T_*^2)$ 与 $(Z_{LAS} - d) / L_{MO}$ 与理论值 De Bruin (1993)、Andreas (1988)、Thiermann 等 (1992) 之间的关系

Fig 3 Relationship between the observed values $(C_T^2 (Z_{LAS} - d)^{2/3} / T_*^2)$ plotted against $(Z_{LAS} - d) / L_{MO}$ and the universal function given by De Bruin (1993)、Andreas (1988)、Thiermann 等 (1992) under unstable conditions at Mijun Guan tao, Ar rou (January-June) and Naqu (August-October) sites in 2009

广^[53]、陈忠明等^[54]、胡丽琴^[55]、卢俐等^[43]与 Xu 等^[56]分析了吉林乾安盐碱地与农田混合、四川乐至丘陵地带的农田、河南郑州的农田、北京密云山区的林地、玉米地与居民地混合以及青海祁连的草地等下垫面上大孔径闪烁仪观测显热、潜热通量的变化特征。

白洁等^[57]利用海河流域密云、馆陶和大兴站 2008—2009 年大孔径闪烁仪的观测数据, 分析了流域内 3 种典型下垫面 (山区林地、平原农田与城郊农田) 上显热通量的季节变化趋势。张劲松等^[58]、朱治林等^[59]、王建林等^[60]、王维真等^[61]与艾力等^[62]分析了闪烁仪观测的河南济源林地 (2009 年 5~ 9 月)、山东禹城农田 (2009 年 4~ 6 月)、江西千烟洲森林 (2003 年 8 月至 2005 年 4 月)、黑河流域的草地与农田 (阿柔站 2008 年 3~ 10 月与 2009 年 1~ 6 月 10~ 12 月; 临泽草地站 2008 年 5~ 8 月)、新疆塔克拉玛干沙漠 (2009 年 6~ 7 月) 上显热通量的变化特征。

图 5 为 2009 年密云、馆陶、阿柔 (1~ 6 月, 10~ 12 月) 与那曲 (8~ 12 月) 站大孔径闪烁仪观测显热

通量 (每个站的 7 天平均值, 每天取正午前后 3 h 平均, 其中密云与馆陶站是 9:00~ 15:00, 阿柔站是 10:00~ 16:00, 那曲站是 11:00~ 17:00) 与蒸散量 (利用地表能量平衡方程余项法推算得到^[44]) 的变化趋势。如图 5a 所示, 密云、阿柔与那曲站 (参照 2010 年的观测数据) 大孔径闪烁仪测量显热通量呈双峰变化趋势, 馆陶为三峰变化特征。从各站显热通量的变化趋势来看: 在 1~ 5 月期间, 密云站的显热通量最大, 其次是阿柔和馆陶站, 其中阿柔站变化平缓, 而馆陶站波动相对较大; 6~ 7 月, 海河流域密云与馆陶站的显热通量要大于阿柔站; 而在 8 月至 10 月中旬, 各站显热通量均呈上升趋势, 此时显热通量仍以密云站为最大, 其他各站显热通量观测值比较接近; 10 月下旬至 12 月, 那曲站观测显热通量最大, 其次是阿柔和密云站, 而馆陶站最小。从图 5b 可以看到, 2009 年海河流域密云站大孔径闪烁仪的蒸散量呈现单峰变化, 馆陶站则为双峰变化趋势。密云与馆陶站的年蒸散量分别为 434.89 524.17 mm。各站显热通量与蒸散量的变化特征与当地天气气候条件以及下垫面的水热状况有关。

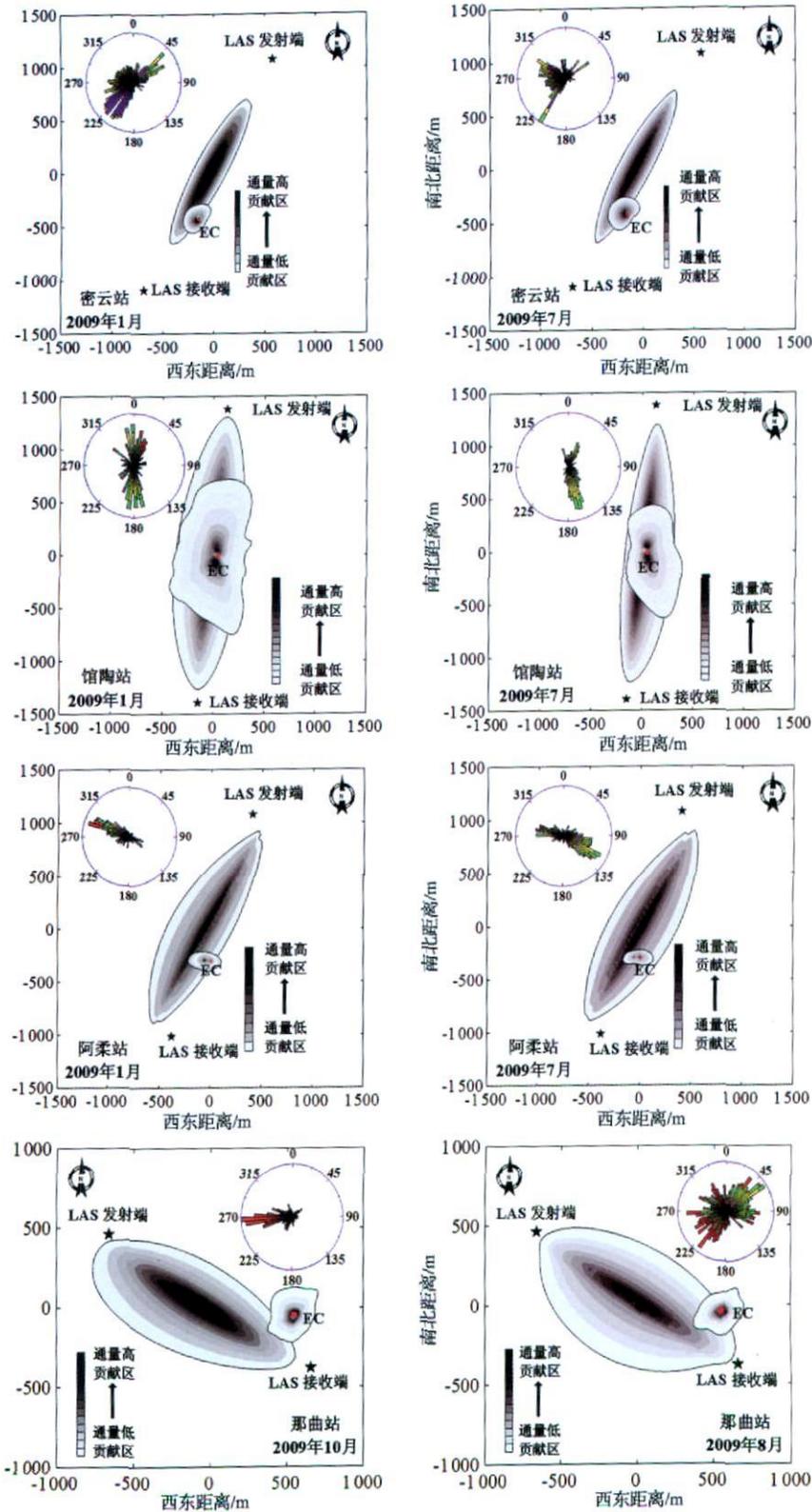


图 4 2009年 1月、7月密云、馆陶、阿柔、那曲站的大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测通量的源区分布图
(那曲站为 8月、10月;密云站为 50%通量贡献源区,其他站为 80%通量贡献源区)

Fig 4 Source areas of the LAS and EC measurements at Miyun, Guantao, Arrou and Naqu sites in January and July, 2009 (August and October at Naqu site; source area of 50% contribution to the measured fluxes at Miyun and 80% at the other sites)

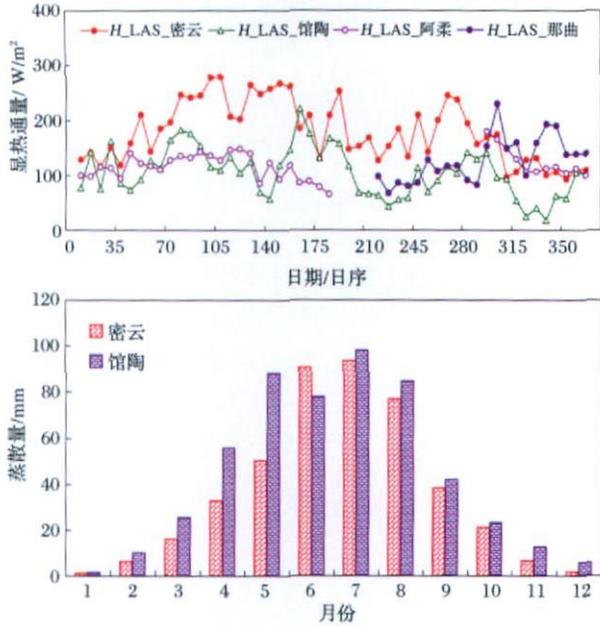


图 5 2009 年大孔径闪烁仪观测显热通量与蒸散量的季节变化

Fig 5 Seasonal variations of sensible heat flux and evapotranspiration measured by LAS in 2009

a 密云、馆陶、阿柔(1~6月、10~12月)和那曲(8~12月)站, 显热通量; b 密云和馆陶站, 蒸散量

a Mì yún, Guān tāo, Ā róu (January-June, October-December) and Naqu (August-December) sites' sensible heat flux; b Mì yún and Guān tāo sites' evapotranspiration

4 大尺度地表水热通量观测数据的应用

4.1 模型精度的验证

大孔径闪烁仪的观测尺度(可达 5~10 km)可以与 1 个或多个遥感像元尺度(如 TM、ASTER、MODIS、GOES 等)以及中尺度数值天气与气候模式等的网格尺度相匹配,因此大孔径闪烁仪的观测值可作为遥感估算模型、中尺度数值天气与气候模式等的像元网格尺度的地面相对真值,从而对这些模型进行校正与验证。

Watts 等^[20]、Hemakumara 等^[26]、Jia 等^[25]、Marx 等^[63]、Tang 等^[64]分别利用大孔径闪烁仪观测数据并结合 NOAA、ATSR、MODIS 等遥感数据,运用单层模型、SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land)、SEBS (Surface Energy Balance System)、地表温度-植被指数特征空间法等估算的显热与潜热通量进行了检验。Kleiss 等^[19]利用美国新墨西哥州 7 个大孔径闪烁仪观测站点的的数据,结合足迹模型对基于 SEBAL 模型,结合 MODIS 数据估算的显热通量进行了验证。Beyrich 等^[23]、Marx 等^[63]应用大孔

径闪烁仪的观测数据对数值天气预报模式 NWP (Numerical Weather Prediction)、中尺度天气模式 MM5 (NCAR Mesoscale Model)的模拟结果进行了验证。

刘雅妮等^[65]依据黑河流域阿柔与临泽草地站大孔径闪烁仪观测数据对 2 种基于多源卫星数据(中高分辨率 Landsat TM 与中低分辨率 MODIS)估算地表通量的方法进行了验证。结果表明:基于多尺度遥感数据的估算方法可以在下垫面不均匀或者地表类型较复杂时得到较好的计算效果,而且大孔径闪烁仪观测数据可以直接用来验证计算结果。李远等^[66]利用密云和阿柔站大孔径闪烁仪与涡动相关仪的观测数据对 SB2 的模拟结果进行了评估,结果表明:利用大孔径闪烁仪观测的显热通量进行模式模拟结果的验证,能够在较大程度上避免涡动相关仪能量不闭合以及观测尺度与模式模拟尺度不匹配在验证中所造成的偏差,验证效果更好。贾贞贞等^[36]提出了一套较为完整的基于大孔径闪烁仪观测数据的遥感监测蒸散量地面验证方法。该方法涉及卫星像元尺度蒸散量地面观测值的获取、观测数据的处理与质量控制、验证流程的建立、验证像元与评价指标的选取等,从遥感监测蒸散量的精度评价、误差来源的分析以及验证过程的误差探讨等 3 个方面对遥感估算结果进行较为全面的评价。其中,结合足迹模型选取验证像元的方法,较好地解决了地面观测蒸散量与遥感估算值之间空间代表范围不匹配的问题。并且利用该方法对北京地区 2008 年遥感估算的区域蒸散量进行验证。结果表明:这套基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法是合理与可行的。该验证方法现已应用于全球环境基金 (GEF)“海河流域水资源与水环境综合管理”项目的遥感监测蒸散量地面验证工作中,分别于 2008 年 12 月、2010 年 5 月发布了《北京地区遥感监测蒸散量 (ET)地面独立验证报告》《海河流域遥感监测蒸散量 (ET)地面独立验证报告》等,引起了世界银行项目专家组、水利部海河水利委员会与北京市水务局等部门的高度关注,促进了遥感估算蒸散量精度的提高。

本文选取密云、馆陶、阿柔和那曲站 2009 年 10 月期间的 4 个晴好日 (15 日、19 日、21 日、22 日),采用大孔径闪烁仪观测数据,对依据单层模型 (Liu 2007)^[67]结合 MODIS 数据估算的瞬时显热通量进行验证(采用大孔径闪烁仪的观测通量源区选取验证像元)。其比较结果如图 6 所示,两者的平均相

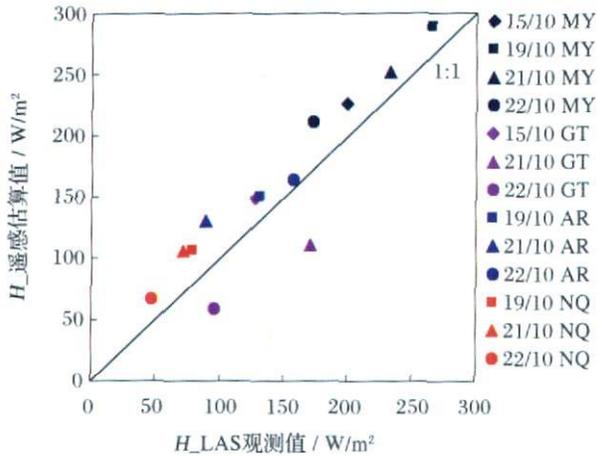


图 6 大孔径闪烁仪观测瞬时显热通量与遥感估算值的比较 (图例为“日/月/站点”)

Fig 6 Comparison of sensible heat fluxes between LAS measurements and remotely sensed estimates at four sites and four satellite overpasses in October 2009 (The legend shows day/month and site name)

对误差为 9.98%, 均方差为 31.76 W/m²。

4.2 通量的尺度效应与尺度转换

通量的尺度效应与尺度转换的分析包括大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测值的比较, 以及利用大孔径闪烁仪对通量的尺度扩展方法进行检验等。

Schottmeyer等^[30]比较了西非半干旱地区混合植被下垫面上涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测的显热通量值, 两者在白天比较一致, 而夜间大孔径闪烁仪观测的显热通量值略高, 并认为下垫面的非均匀性导致了两者的离散。Hoedjes等^[29]对灌溉前、中与后 3 个时期橄榄园的涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量进行了比较, 发现土壤湿度与源区的差异是主要原因。Ezzahar等^[52]比较了灌溉的橄榄园中涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量、潜热通量, 认为两者的差异由不同的源区、涡动相关仪的能量平衡闭合率以及可利用能量的估算误差等引起。Randow等^[33]分析了亚马孙热带雨林中涡动相关仪与大孔径闪烁仪观测显热通量, 发现大孔径闪烁仪观测值常常大于涡动相关仪值, 并归功于大孔径闪烁仪观测的面积平均效应。白洁等^[57]比较了 2008 年 4~9 月馆陶站农田下垫面上大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的差异, 认为涡动相关仪的能量平衡闭合率、大孔径闪烁仪和涡动相关仪源区的重叠程度与下垫面的非均匀性是造成差异的主要原因。图 7 是 2009 年密云、馆陶、阿柔 (1~6 月, 10~12 月) 与那曲 (8~10 月) 站大孔径闪烁仪

观测显热通量与涡动相关仪观测值的比较。从图中可知, 大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的差异从低到高分别是: 那曲、阿柔、馆陶与密云站, 其原因与涡动相关仪的能量平衡闭合程度、两者源区的差异以及下垫面非均匀性等有关。

Beyrich等^[11]利用涡动相关仪等测量了 20 km × 20 km 范围内 13 个点的局地通量值, 并通过聚合方法得到区域通量值, 与大孔径闪烁仪的观测值较吻合。Ezzahar等^[68]利用分别架设在 2 个橄榄园上的大孔径闪烁仪和涡动相关仪的观测数据, 先后比较了斑块与网格尺度上 (通过聚合方法得到) 大孔径闪烁仪和涡动相关仪的显热通量, 其 R^2 分别为 0.89 与 0.75, 两者的一致性较好。Ezzahar等^[34]利用 3 台涡动相关仪观测的显热通量, 基于面积比例权重方法聚合得到区域的显热通量, 并与大孔径闪烁仪观测的区域平均通量值进行比较, 两者的观测结果比较一致。Ezzahar等^[69]还利用 2 个橄榄园的大孔径闪烁仪观测数据, 对非均匀下垫面网格尺度上时空扩展方法进行了检验。彭谷亮等^[70]利用 2005 年北京昌平小汤山的大孔径闪烁仪与涡动相关仪的观测数据, 依据足迹模型计算通量贡献率, 并将 2 个小区 (杂草地、裸地) 的涡动相关仪观测显热通量聚合为区域平均值, 与大孔径闪烁仪的观测值吻合较好。卢俐等^[71]利用北京昌平小汤山 2002 年、2004 年涡动相关仪和大孔径闪烁仪的观测数据, 构建了一个由多点涡动相关仪观测通量聚合为整个区域平均值的公式。张劲松等^[58]利用河南省济源市低丘山地人工混交林 2009 年 5~9 月期间 1 台大孔径闪烁仪和 2 台涡动相关仪的观测数据, 对比了 2 种计算区域显热通量的方法 (算术平均法与聚合法), 发现卢俐聚合方法的计算效果较好。另外, 涂刚等^[72]利用乾安站 2000—2005 年 5~9 月观测数据, 尝试依据大孔径闪烁仪观测大气折射指数的结构参数 C_n^2 来预报未来晴雨状况, 并进行了初步检验。

5 结论与展望

近 20 多年来, 闪烁仪在测量仪器与观测试验、观测数据的处理与分析、观测数据的应用等方面都取得了长足的进步, 正发展成为监测大尺度地表水热通量的一种有效且通用的方法^[15]。今后还应加强以下几个方面的研究: ① 光波的传播理论、闪烁的机理以及非均匀下垫面上相似理论的适用性等; ④ 发展无线电波的闪烁仪, 结合光学大孔径闪烁仪, 形

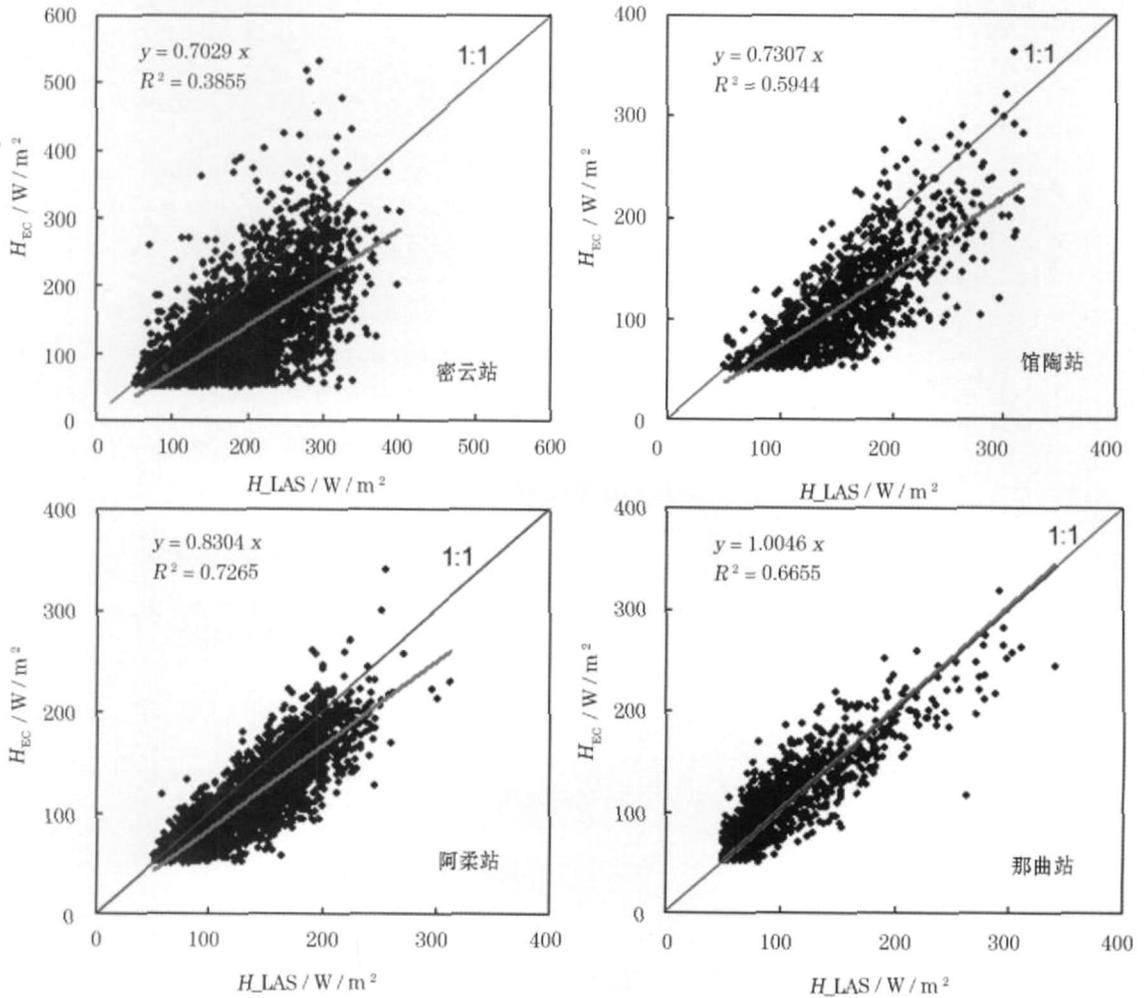


图 7 2009年密云、馆陶、阿柔(1~ 6月, 10~ 12月)与那曲(8~ 10月)站大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的比较(显热通量大于 50 W /m²)

Fig 7 Comparison of sensible heat fluxes measured by LAS and EC at M iyun, Guan tao, A' rou (January-June, October-December) and Naqu (August-October) sites in 2009 (Sensible heat flux larger than 50 W /m²)

成“两波段”的测量方法,从而可直接观测大尺度地表蒸散量; 建立由多台大孔径闪烁仪构成的、覆盖全国的、长期的业务观测站网,可验证遥感产品、水文模型、数值天气和气候预报模式等,也可将大孔径闪烁仪的观测数据同化到模式中,以提高模式的预报精度。

参考文献 (References):

[1] Xin X iaozhou, Tian Guoliang, Liu Q inhuo. A review of researches on remote sensing of land surface evapotranspiration [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7 (3): 233-240 [辛晓洲, 田国良, 柳钦火. 地表蒸散定量遥感的研究进展 [J]. *遥感学报*, 2003, 7 (3): 233-240]

[2] Gao Yan chun, Long Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12 (3): 515-528. [高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发

模型研究进展 [J]. *遥感学报*, 2008, 12 (3): 515-528]

[3] Li Z L, Tang R L, Wan Z M, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. *Sensors*, 2009, 9, 3 801-3 853.

[4] Yang K, Coauthors. Initial CEOP-based review of the prediction skill of operational general circulation models and land surface models [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2007, 85A: 99-116.

[5] Kato H, Rodell M, Beyrich F, et al. Sensitivity of land surface simulations to model physics and characteristics and forcings at four CEOP sites [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 2007, 85, 187-204.

[6] Famiglietti J S, Wood E F. Effects of spatial variability and scale on areally averaged evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 1995, 31 (3): 699-712.

[7] Hu Z L, Iskm S, Jiang L. Approaches for aggregating heterogeneous surface parameters and fluxes from mesoscale and climate models [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1999, 93 (2): 313-336.

- [8] Lu L J, Liu Shaomin, Sun M in zhang *et al*. Advances in the study of area surface fluxes with large aperture scintillimeter [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): 932-936]
- [9] Claussen M. Flux aggregation at large scales: On the limits of validity of the concept of blending height [J]. *Hydrology*, 1995, 166: 371-382.
- [10] Gottschalk L, Bathvarova E, Grynning S E. Scale aggregation-comparison of flux estimates from NOPEX [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 98(99): 103-119
- [11] Beyrich F, Peter J I, Mathias M, *et al*. Area-averaged surface fluxes over the LIFPASS region based on eddy-covariance measurements [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 33-65.
- [12] Desjardins R L, Madherson J I, Schuepp P H, *et al*. An evaluation of aircraft flux measurements of CO₂, water vapor and sensible heat [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1989, 47: 55-69
- [13] Gioli B, Miglietta F, De Martino B, *et al*. Comparison between tower and aircraft-based eddy covariance fluxes in five European regions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127: 1-16
- [14] Isaac P R, Mananey J, Leuning R, *et al*. Comparison of aircraft and ground-based flux measurements during OASIS95 [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 110: 39-67
- [15] Moene A F, Oscar K H, Beyrich F. Developments in scintillimetry [J]. *Bulletin of American Meteorology Society*, 2009, 90(5): 694-698
- [16] Kleissl J, Gomez J, Hong S H, *et al*. Large aperture scintillimeter intercomparison study [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 128: 133-150.
- [17] Kleissl J, Watts C J, Rodriguez J C, *et al*. Scintillimeter intercomparison study-continued [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2009, 130: 437-443.
- [18] Shi Shengjin, Huang Binxiang, Liu Shaomin, *et al*. Development of a measuring system for surface energy and water vapor fluxes at large scale [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1128-1138. [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] Kleissl J, Sung H H, Hendrickx J M H, *et al*. New Mexico scintillimeter network: Supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models [J]. *Bulletin of American Meteorology Society*, 2009, 90(2): 207-218.
- [20] Watts C J, Chehbouni A, Rodriguez J C, *et al*. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillimeter measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 105: 81-89.
- [21] Meijninger W M L, Green A E, Hartogensis O K, *et al*. Determination of area averaged water vapour fluxes with large aperture and radio wave scintillimeters over a heterogeneous surface-Flevoland field experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 63-83
- [22] Meijninger W M L, De Bruin H A R. The sensible heat fluxes over irrigated areas in western Turkey determined with a large aperture scintillimeter [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 229: 42-49
- [23] Beyrich F, De Bruin H A R, Meijninger W M L, *et al*. Results from one-year continuous operation of a large aperture scintillimeter over a heterogeneous land surface [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 85-97
- [24] Hartogensis O K, De Bruin H A R, Van De Wiel B J H. Displaced-beam small aperture scintillimeter test: Part II: CASES-99 stable boundary-layer experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 149-176
- [25] Jia L, Su Z B, Hu R B, *et al*. Estimation of sensible heat flux using the Surface Energy Balance System (SEBS) and ATSR measurements [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2003, 28: 75-88.
- [26] Hamakura H M, Chandrapala M, Moene A F. Evapotranspiration fluxes over mixed vegetation areas measured from large aperture scintillimeter [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 58: 109-122
- [27] Hoedjes J C B, Zuurbier R M, Watt C J. Large aperture scintillimeter used over a homogeneous irrigated area: partly affected by regional advection [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 99-117
- [28] Kohsiek W, Meijninger W M L, Moene A F, *et al*. An extra large aperture scintillimeter for long range applications [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 119-127.
- [29] Hoedjes J C B, Chehbouni A, Ezzahar J, *et al*. Comparison of large aperture scintillimeter and eddy covariance measurements: can thermal infrared data be used to capture footprint-induced differences? [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8: 144-159.
- [30] Schtemeyer 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
- [31] Meijninger W M L, Beyrich F, L di A, *et al*. Scintillimeter-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface—a contribution to LIFPASS-2003 [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 89-110.
- [32] Kohsiek W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, *et al*. Saturation of the large aperture scintillimeter [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 111-126
- [33] Randow C V, Kruit B, Holtslag A A M, *et al*. Exploring eddy-covariance and large-aperture scintillimeter measurements in an Amazonian rain forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 680-690
- [34] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J, *et al*. Combining scintillimeter measurements and an aggregation scheme to estimate area-averaged latent heat flux during the AMMA experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375: 217-226
- [35] Guyot A, Cohard J M, Anquetin S, *et al*. Combined analysis of energy and water balances to estimate latent heat flux of a Sudanian small catchment [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 375: 227-

240

- [36] Jia Zhenzhen, Liu Shaomin, Mao Defa, *et al*. A study of the validation method of remotely sensed evapotranspiration based on observation data [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (11): 1 248-1 260 [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): 1 248-1 260.]
- [37] Xu Ziwei, Huang Yongbin, Liu Shaomin. A Study of the observation method of large aperture scintillometer [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (11): 1 139-1 147 [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): 1 139-1 147.]
- [38] De Bruin, Kohsiek W, Huuk V. A verification of some methods to determine the fluxes of momentum, sensible heat and water vapor using standard deviation and structure parameter of scalar meteorological quantities [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1993, 63: 231-257.
- [39] 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.
- [40] Thiemann V, Grassl H. The measurement of turbulent surface layer fluxes by use of bichromatic scintillation [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992, 58: 367-389.
- [41] Hartogensis O K, Watts C J, Rodriguez J C, *et al*. Derivation of an effective height for scintillometers: La Poza experiment in northwestern Mexico [J]. *American Meteorological Society*, 2003, 4: 915-928.
- [42] Odhiambo G O, Savage M J. Sensible heat flux by surface layer scintillometry and eddy covariance over a mixed grassland community as affected by Bowen ratio and MOST formulations for unstable conditions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2009, 10: 479-492.
- [43] Lu Li, Liu Shaomin, Xu Ziwei, *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. 不同下垫面上大孔径闪烁仪观测数据的处理与分析 [J]. 应用气象学报, 2009, 20 (2): 171-178.]
- [44] 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): 1 148-1 165. [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): 1 148-1 165.]
- [45] Horst T W, Weil J C. How far is far enough?: the fetch requirements for micrometeorological measurement of surface fluxes [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1994, 11: 1 018-1 025.
- [46] Peng Guliang, 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.]
- [47] Komann R, Meixner F X. An analytic footprint model for non-neutral stratification [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 207-224.
- [48] Gong Lijuan, Liu Shaomin, Shuang Xi, *et al*. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements with eddy covariance system and large aperture scintillometer [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28 (2): 246-257. [宫丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性 [J]. 高原气象, 2009, 28 (2): 246-257.]
- [49] Shuang Xi, Liu Shaomin, Xu Ziwei, *et al*. Investigation of spatial representativeness for surface flux measurements in the Heihe river basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24 (7): 724-733. [双喜, 刘绍民, 徐自为, 等. 黑河流域观测通量的空间代表性研究 [J]. 地球科学进展, 2009, 24 (7): 724-733.]
- [50] Zheng Ning, Zhang Jinsong, Meng Ping, *et al*. Distribution of flux source area and footprint for the scintillation method over a mixed plantation in the hilly zone of the north China [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (11): 1 175-1 186. [郑宁, 张劲松, 孟平, 等. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布 [J]. 地球科学进展, 2010, 25 (11): 1 175-1 186.]
- [51] Cai Xuhui, Zhu Mingjia, Liu Shaomin, *et al*. Flux footprint analysis and application for the large aperture scintillometer [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25 (11): 1 166-1 174. [蔡旭晖, 朱明佳, 刘绍民, 等. 大孔径闪烁仪的通量印痕分析与应用 [J]. 地球科学进展, 2010, 25 (11): 1 166-1 174.]
- [52] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J C B, *et al*. The use of the scintillation technique for monitoring seasonal water consumption of olive orchards in a semi-arid region [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89: 173-184.
- [53] Zhi Keguang, Tu Gang, Lian Yi, *et al*. Measuring sensible heat fluxes over saline-alkali land area in Qian'an district [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60 (6): 780-785. [支克广, 涂钢, 廉毅, 等. 乾安地区盐碱地地热通量的测量 [J]. 气象学报, 2002, 60 (6): 780-785.]
- [54] Chen Zhongning, Gao Wenliang, Min Wenbin, *et al*. A study of monitoring land-atmosphere interaction in hilly region of Sichuan basin using large aperture scintillometer [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22 (suppl): 40-44 [陈忠明, 高文良, 闵文彬, 等. 四川盆地丘陵地区地气相互作用的观测分析 [J]. 高原气象, 2003, 22 (增刊): 40-44.]
- [55] Hu Liqin, Wu Rongzhang, Fang Zongyi. Large aperture scintillometer and its application to surface energy balance monitoring [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14 (2): 197-205. [胡丽琴, 吴蓉璋, 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.]
- [56] Xu Z W, Liu S M, Wang W Z, *et al*. Evapotranspiration measurements over different surfaces in the Heihe river basin [C] // *Biohydrology of Farmland under Desertification*. SPA & Water Press, 2010: 86-106.
- [57] Bai Jie, Liu Shaomin, Ding Xiaoping. Temporal-spatial charac-

- teristics analysis of area-averaged sensible heat fluxes by large aperture scintillimeter over Hai river basin [J]. *Advances in Earth Science* 2010, 25(11): 1 187-1 198 [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): 1 187-1 198.]
- [58] Zhang Jinsong, Meng Ping, Zheng Ning, *et al*. The feasibility of using LAS measurements of the sensible heat flux from a mixed plantation in the hilly zone of the north China [J]. *Advances in Earth Science* 2010, 25(11): 1 283-1 290 [张劲松, 孟平, 郑宁, 等. 大孔径闪烁仪法测算低丘山地上人工混交林显热通量的可行性分析 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 283-1 290.]
- [59] Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Jia Yanyuan, *et al*. The uncertainty of sensible heat flux measurement over cropland using Large Aperture Scintillimeter (LAS) [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 199-1 207 [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): 1 199-1 207.]
- [60] Wang Jianlin, Wen Xuefa, Sun Xiaomin, *et al*. Intercomparison of sensible heat flux measurement based on eddy covariance and small aperture scintillimeter above the forest canopy [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 217-1 227 [王建林, 温学发, 孙晓敏, 等. 涡动相关系统和小孔径闪烁仪观测的森林显热通量的异同研究 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 217-1 227.]
- [61] Wang Weizhen, Xu Ziwai, Li Xin, *et al*. A study of applications of large aperture scintillimeter in the Hehe river basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 208-1 216 [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): 1 208-1 216.]
- [62] Ali Man tin in, He Qing, Huo Wen, *et al*. Inter-comparison of sensible heat fluxes measured by large aperture scintillimeter and eddy covariance system in hinterland of the Taklimakan desert [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 228-1 236. [艾力·买买提明, 何清, 霍文, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地 LAS 和 EC 观测感热通量对比分析 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 228-1 236.]
- [63] Max A, Kunstmann H, Schuttmeier D, *et al*. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillimeter measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results [J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2008, 148: 656-667.
- [64] Tang R L, Zhao L L, Tang B H. An application of the Ts-VI triangle method with enhanced edges detection for evapotranspiration estimation from MODIS data in arid and semi-arid regions: Implementation and validation [J]. *Remote Sensing of Environment* 2010, 114: 540-551.
- [65] Liu Yan, Xin Xiaozhou, Liu Qinhuo, *et al*. Method and validation for surface fluxes estimation based on multi-scale remotely sensed data [J]. *Advances in Earth Science* 2010, 25(11): 1 261-1 272 [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): 1 261-1 272.]
- [66] Li Yuan, Sun Rui, Liu Sham in. Preliminary study on the validation of land surface models with large aperture scintillimeter data [J]. *Advances in Earth Science* 2010, 25(11): 1 237-1 247 [李远, 孙睿, 刘绍民. 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): 1 237-1 247.]
- [67] Liu SM, Hu G, Lu L, *et al*. Estimation of regional evapotranspiration by TM/EIM + data over heterogeneous surfaces [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007, 73(10): 1 169-1 178.
- [68] Ezzahar J, Chehbouni A, Hoedjes J C B, *et al*. On the application of scintillimetry over heterogeneous grid [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 334: 493-501.
- [69] Ezzahar J, Chehbouni A. The use of scintillimetry for validating aggregation schemes over heterogeneous grids [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 2 098-2 109.
- [70] Peng Guliang, Liu Sham in, Cai Xuhui, *et al*. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface [J]. *Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1 064-1 070 [彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析 [J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1 064-1 070.]
- [71] Lu Li, Liu Sham in, Xu Ziwai. The scale relationship of sensible heat flux measured by large aperture scintillimeter and eddy covariance system [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 273-1 282 [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): 1 273-1 282.]
- [72] Tu Gang, Zhi Keguang, Zhi Ping, *et al*. A significant relationship between structure parameter of the refractive index of air and rainfall in May-Sep over northeast of China [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(11): 1 292-1 296 [涂钢, 支克广, 支平, 等. 大气折射指数的结构参数与北方 5~9 月降雨的强相关现象 [J]. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1 292-1 296.]

Measurement Analysis and Application of Surface Energy and Water Vapor Fluxes at Large Scale

LU Shaomin¹, LIXiaowen¹, SHI Shengjin², XU Ziwei¹, BAI Jie¹,
DING Xiaoping¹, JIA Zhenzhen¹, Zhu Mingjia¹

(1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract The measurements of surface energy and water vapor fluxes at large scale are crucial for solving the area-averaging problem from local in situ measurements to area-integrated information, validating hydrological and meteorological models and verifying remote sensing products etc. This paper reviews the worldwide progress in surface energy and water vapor fluxes at large scale using scintillimeter, from these aspects of observation instruments and experiments and processing analysis and application of observational data. A brief outlook about scintillimeter is given.

Key words Large scale; Surface energy and water vapor fluxes; Scintillimeter

海地地震研究产生意外结果

根据《自然—地质科学》(Nature Geoscience)在线发表的研究成果, 2010年1月份造成20万人死亡、摧毁海地经济的7级强震不是由之前认为的Enriquillo断层引起的, 而是由多个断层的滑坡引起的, 主要是一个之前不为人所知的地下断层。此外, 由于地震不涉及地表附近的滑坡, 研究显示, 它没有释放所有的过去200年间该地区形成的断层的张力, 这意味着在该地区将来很可能发生地表断裂型地震。

加利福尼亚州Pasadena的NASA喷气推进实验室的地球物理学家Eric Fielding、美国地质勘测部的Gavin Hayes和其他来自USGS加利福尼亚科技学院、德克萨斯大学、日本名古屋大学的同事, 组合使用地震观测数据、地质野外资料和卫星测地数据分析了震源。最初海地地震被认为是沿着单个Enriquillo断层的运动的结果, 该断层容纳了加勒比海和北美构造板块间的运动。但该领域的科学家没有在Enriquillo断层上发现地表断裂的证据。研究人员发现地表变形的形式受以前尚未知晓的运动控制, 是一地表下的逆冲断层, 名为Logane断层, 它并未使地表断裂。

该研究使用了日本宇宙开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的一颗卫星, Fielding分析了该卫星提供的合成孔径雷达干涉测量数据, 他表示, 当看到卫星数据显示海底地震肯定使另一个不同的断层断裂, 而不是大家都认为的Enriquillo断层, 我感觉震惊。如果没有雷达图像, 我们可能仍在惊讶于发生了什么。

Fielding说, 地震后NASA凭借喷气推进实验室建立的无人飞行器合成孔径雷达(Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar UAVSAR)等航空仪器, 获取到Hispaniola主要断层带的图像, 这将为科学家提供更多详细的信息, 以预测未来另一大地震是否会在该地区发生。

(宁宝英 编译)

原文题目: Study of Haiti Quake Yields Surprising Results

来源: <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/haiti20101014.html>