第 25卷 第 11期
2010年 11月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol. 25 No. 11
Nov., 2010

文章编号: 1001-8166(2010)11-1273-10

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

卢 俐[1,2], 刘绍民[2*], 徐自为[2], 白 洁[2], 王介民[3]

(1. 北京市气象局气象信息中心, 北京 100089; 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; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 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, 借助解析足迹模型计算的源区, 分析均匀、非均匀下垫面上涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量之间的差异和关系。结果表明: 地表的均匀与非均匀性质, 直接影响涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测的显热通量的差异大小。在分析均匀、非均匀地表上 2种仪器源区重叠面积及重叠区域内足迹值大小与观测通量值之间的关系后, 构建了一个非均匀地表上 2台涡动相关仪与 1台闪烁仪观测通量之间的尺度关系式。

关 键 词: 显热通量; 涡动相关仪; 大孔径闪烁仪; 尺度

中图分类号: P404 文献标志码: A

1 引 言

数值天气预报模式(NWP)和气候模式, 利用一些参数化方案, 对地表与大气之间的相互作用进行必要的描述。这些参数化方案的发展和验证, 主要根据均匀地表的实测资料进行。地表均匀的假定仅在局地(斑块)尺度(10~1 000 m)有效, 而在当前的区域大气模式的网格尺度上(几公里~几十公里), 地表一般是非均匀的。因此, 近 15~20年来, 在全球不同气候带不同地区开展了很多非均匀地表的观测(如 HAPEX-MOBILHY, BOREAS, LITFASS 等)[1~3]。在这些观测区域, 为了更好地了解地表通量(尤其是显热和潜热通量)的空间变化情况, 一般是用多台涡动相关仪(Eddy Covariance system, EC)测量各个不同地表类型(如森林、草地、农田等)上的通量值, 同时还有一台或几台光程路径长达数公里的大孔径闪烁仪(Large Aperture Scintillometer, LAS)测量整个非均匀实验区域的通量值[4~10], 也有辅助以探空测量或飞机测量[1, 11]。因此, 研究斑块地表上大孔径闪烁仪与涡动相关仪测量值之间的关系是非常必要的。

目前, 探讨单点尺度与区域尺度通量观测值之间的关系是属于一个刚刚展开的研究方向, 其基本出发点是将涡动相关仪观测的各个地表类型斑块通量值按照一定的平均法则(如面积权重法[4]、LAS 光程路径权重法[5]、足迹权重法[6])得到区域值, 再与 LAS的测量值比较, 结果表明: 两者吻合较好[4, 6~8]或者有一定的相关性[5, 9, 10]。

大孔径闪烁仪最大的特点是, 其测量到的通量是整个光程路径上所观测到的所有湍流涡旋在空间和时间上的平均, 而涡动相关仪仅是一个单点观测。这 2个仪器观测通量的空间代表范围均与观测高

收稿日期: 2010-05-25; 修回日期: 2010-09-13

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: 卢俐(1980-), 女, 四川成都人, 工程师, 主要从事地表水热通量的研究. E-mail: lulicd@126.com

* 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: smliu@bnu.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度、风向 /风速、大气稳定度以及下垫面特性 (地表粗糙度等)有关。近年来发展起来的足迹模型能够精确描述仪器观测通量的代表范围大小 (即通量贡献源区), 以及源区范围内各个单元的相对贡献量[6 12]。因此, 利用足迹模型, 可定量分析地表通量的尺度关系与尺度转换。

基于已有的研究, 本文拟借助于解析足迹模型, 利用 2002年、2004年北京昌平小汤山的观测资料, 分析大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测的显热通量 (H_{LAS}, H_{EC})的差异, 并建立转换关系。

2 观测场、观测仪器与数据处理

小汤山观测场位于北京昌平小汤山国家精准农业试验基地 (116°26′52″E, 40°10′41″N), 东西宽 450 m, 南北长 1 000 m。2002年在观测场的西北角放置一台 LAS发射仪, 接收仪 (LAS150, 瓦赫宁根大学, 荷兰)在观测场南端, 光径长度 934 m, 架高 4 m。在观测场的中间位置有一套涡动相关仪 (架高 2 m。DA600, KAIJO, Japan; Li7500, Campbell)测量地表水热通量, 并有净辐射 (TBB-1, 中国锦州 322研究所)、土壤热通量 (土壤热通量板, 中国农业大学研制)等的观测。2004年在同一观测场开展了通量观测, 设在观测场中间的道路将其分成南北 2个小区。在南北小区的中间位置设立了 2个观测点, 各有一套涡动相关系统 (南北架高分别为 1.8和 1.9 m。CSAT3, Campbell; Li7500, Campbell)和自动气象站进行地表通量和气象要素的观测, 同时辅以净辐射 (CNR1, Kipp& Zonen)、土壤热通量 (HFT3, Campbell; HFP01, Hukeseflux)等的观测。在观测场的南端和北端铁塔上分别架设 LAS的发射仪和接收仪 (光径长度 1 000 m, 架高 8 m。LAS150, 瓦赫宁根大学, 荷兰)。所有观测资料均处理成 10 min数据。

2002年小汤山涡动相关仪和 LAS同步观测时段为 2002年 3月 26日至 4月 23日, 此时观测场是均匀的裸地。2004年小汤山涡动相关仪和 LAS同步观测的时段为 2004年 5月 30日至 6月 16日, 此时南边小区为裸地, 北边小区为杂草地, 平均高度 20 cm。

本文按照如下标准选择数据: ①非降雨天; ②同一时刻的 H_{EC}、H_{LAS}数据均有; ③仅白天不稳定时段 (8:00~17:00); ④对应时刻的 H_{LAS}、H_{EC}均小于净辐射。由此选择出 2002年样本 678个 (3月 30日至 4月 21日)。其中, 东 (45~135°)、南 (135~225°)、西 (225~315°)和北 (315~360°, 0~45°) 4个风向上的样本数各为 219、156、192和 111, 主风方向不明显。2004年样本 718个 (5月 30日至 6月 15日), 东南西北 4个风向上的样本数各为 234、352、29和 103, 南风为主风向。由于西风向样本数太少, 2004年仅从东、南和北风向讨论 H_{LAS}与 H_{EC}之间的关系。

3 下垫面特征与观测通量源区

3.1 下垫面特征

图 1是 2002年 4月 12日、2004年 6月 12日小汤山观测场卫星过境时刻可见光波段合成的假彩色影像图。对于 2002年, 涡动相关仪的观测点、LAS的发射端、接收端均位于青灰色调像元, 表明它们处于同一类型地表 (裸地)。而 2004年北边涡动相关仪所在像元为红色调 (植被), 南边涡动相关仪所在像元为青灰色调 (裸地), LAS的发射端和接收端则分别位于红、青灰色调像元, LAS光径路线经过这 2种地表。

地表温度是影响显热通量的重要热力学因子。在观测期间, 卫星过境时刻均进行了相应的地面辐射温度测量。其中 2002年按照选定的一条直线路径来回观测地表温度, 共测得 240个点的地表辐射温度值。2004年进行了观测场内南北小区各 2条 (共 4条)巡回测温线的同步观测, 每条测温线长约 500 m, 按 2 m间隔进行测温[13]。将观测到的地表辐射温度值经黑体标定后[13], 进行统计处理 (表 1)。2004年 4条测温线的辐射温度均方差 *RMSD* 在 4~10℃, 而 4条线整体的 *RMSD* (可以看作表征整个实验场的 *RMSD*)值为 7.9℃, 均大于 2002年小汤山的 *RMSD*。2004年的地表辐射温度在空间上的变化远大于 2002年。因此, 本文将 2002小汤山观测场视为相对均匀地表 (裸地), 2004小汤山观测场则视为由一半裸地和一半植被 (杂草地)组成的非均匀地表。

3.2 观测通量的源区

涡动相关仪和 LAS的源区, 由足迹模型计算得到。本文使用的涡动相关仪足迹模型 PKUAPE为解析模型[12]。LAS接收仪测量到的光强, 是空间权重方程 $W(s)$的函数, 该方程表达了 LAS光程上每点的折射效应对测量结果的贡献比例。因此 LAS足迹函数从单点的足迹模型出发, 将空间权重方程 $W(s)$对足迹的影响考虑其中, 从而得到 LAS的足迹模型 PKULAS[12]。这 2个模型均以 60×60网格, 30 m分辨率的空间范围计算源区。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　2002年、2004年小汤山观测中卫星过境时刻对应地表巡回测温的统计结果

Table 1　Statistic results of radiometric surface temperature in 2002 and 2004

日期 & 样方		有效测温个数	辐射温度均值 /℃	辐射温度均方差 RMSD /℃
3 1	2002-4-12		240	30 3
2004-6-12	东北测温线	494	38 6	5 8
	西北测温线	456	43 0	6 8
	东南测温线	510	45 9	4 2
	西南测温线	510	37 2	10 2
	东南西北四线	1 970	41 1	7 9

在均匀、非均匀地表的不同风向上, 小汤山观测场涡动相关仪的 80% 和 90% 源区之间的区域, 占 90% 源区的面积比例在 50% ~ 60%。对于 LAS, 这个比例在 40% 左右。也就是说 80% 与 90% 源区之间的这个区域几乎占了 90% 源区面积的一半, 但对观测通量的贡献仅为 10%。因此在本文中, 涡动相关仪和 LAS均选择 80% 的源区作为对测量值有影响的区域进行后面的研究和分析。

4　不同下垫面上大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量的比较

4 1　地表温度的空间变化

根据计算显热通量的整体输送公式: $H = \rho_a C_p (T_s - T_a) / r_{ah}$, 空气密度 ρ_a 和空气定压比热 C_p 是常数。经分析, 气温 T_a 及空气动力学阻抗 r_{ah} 在实验场范围内基本一致。因此, 地表温度 T_s 成为影响显热通量的主要因子。

地表温度遥感影像图能很好的反映其在空间上的变化, 利用 2 次实验中可用的两景遥感影像 (2002-04-12, TM 影像, 北京时间 10 31过境, 覃志豪单窗算法[14]; 2004-06-12, ASTER, 北京时间 11: 10过境, TES算法)反演出过境时刻地表温度。将仪器的源区与地表温度遥感影像图叠加 (均为 30 m 分辨率) (图 2), 分别计算 EC、LAS源区范围内像元地表温度的 RMSD 值 (T_s_RMSD)。对于 2002年, EC和 LAS源区范围内的 T_s_RMSD 分别为 1 5、1 8 K, 相差 0 3 K; 对于 2004年, 南 (北)涡动相关仪和 LAS源区范围内的 T_s_RMSD 分别为 1 1 (1 0)、1 6 K, 相差 0 5(0 6) K。很明显, 在非均匀地表, 地表温度的空间变化更大, 即地表的均匀与非均匀性质, 直接影响 EC 和 LAS观测的显热通量的差异大小。

4 2　均匀下垫面 (2002小汤山)

图 3是东、南、西、北风向上, LAS和涡动相关仪观测的显热通量 H_{LAS}、H_{EC} 的散点图。除了北风方向, 其他 3个风向上两者的拟合系数都比较接近 (从东到西分别为: 0 869, 0 864, 0 882), 而北风方向稍高 (0 922)。南、北方向上的 R^2 接近 (南: 0 828, 北: 0 861) 且高于东、西方向 (东: 0 799, 西: 0 749)。

本文计算了观测时段内 EC和 LAS在 4个风向上的源区, 并统计两者重叠源区内的网格数、重叠区域内 LAS的足迹值和与 LAS源区的足迹总和比 (足迹权重比) (表 2)。4个风向上 2个仪器的源区均完全落在观测场内, 北风向上 2个源区重叠的面积最大, 足迹权重比最高。因此, 北风向上 H_{EC}、H_{LAS} 的 R^2 最大, 而 R^2 大小表示 2个变量之间的共变趋势大小。2个仪器的源区在北风向上重叠最好, 测量值也最接近 (拟合系数 0 922)。

表 2　不同风向上涡动相关仪和 LAS源区的比较

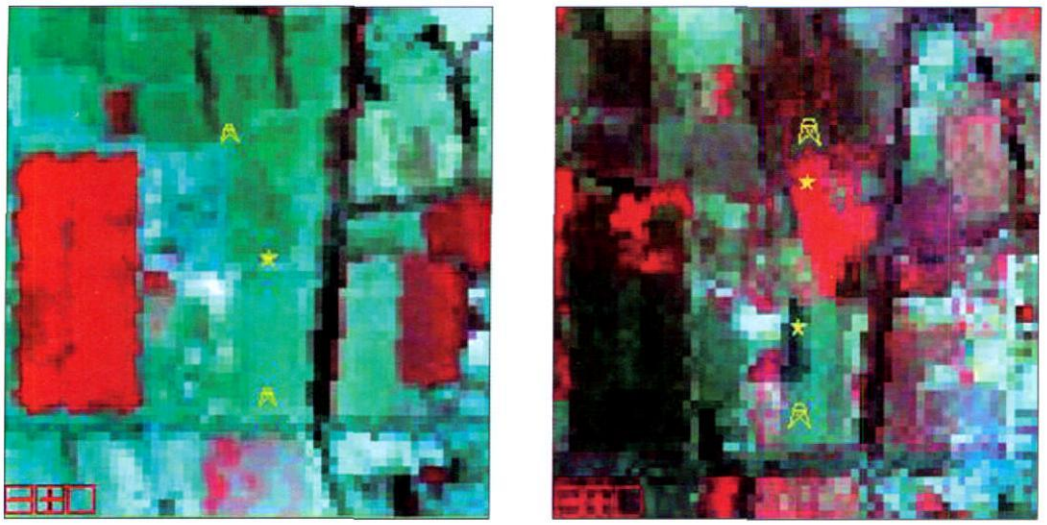
Table 2　Comparison of source areas between LAS and EC at different wind directions

EC、LAS源区	东风	南风	西风	北风
重叠网格数	7	8	5	12
足迹权重比	6%	9%	8%	15%

西风方向上, 源区的重叠面积 (网格数) 最小, 即 2个仪器所测量的下垫面差别最大, 所以 R^2 在 4个风向上最小, 两者的共变趋势最小。但 2002年小汤山是平坦均匀裸地, 并且该风向上重叠区域占 LAS源区的足迹权重比值与东、南风方向差异并不大, 因此测量值的差异并未明显不同于其他风向。东、南、西 3个风向上的 H_{EC}、H_{LAS} 的拟合斜率比较接近。南风与东风向的拟合斜率虽然接近, 但南风向上 R^2 大于东风向, 因为南风向上 2个观测通量源区重叠的面积大于东风向 (8网格 > 7网格), 并且重叠区域占 LAS 源区的足迹权重比也大于东风向 (9% > 6%)。总的来说, 南、北风方向上, 2个源区的重叠度好于东、西风方向, H_{LAS} 与 H_{EC} 的共变趋势也是南、北风向好于东、西风向。

总之, 在均匀地表上, EC与 LAS源区内重叠部分的足迹权重比例, 决定了 2个仪器测量值的变化趋势, 以及测量值的差异。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



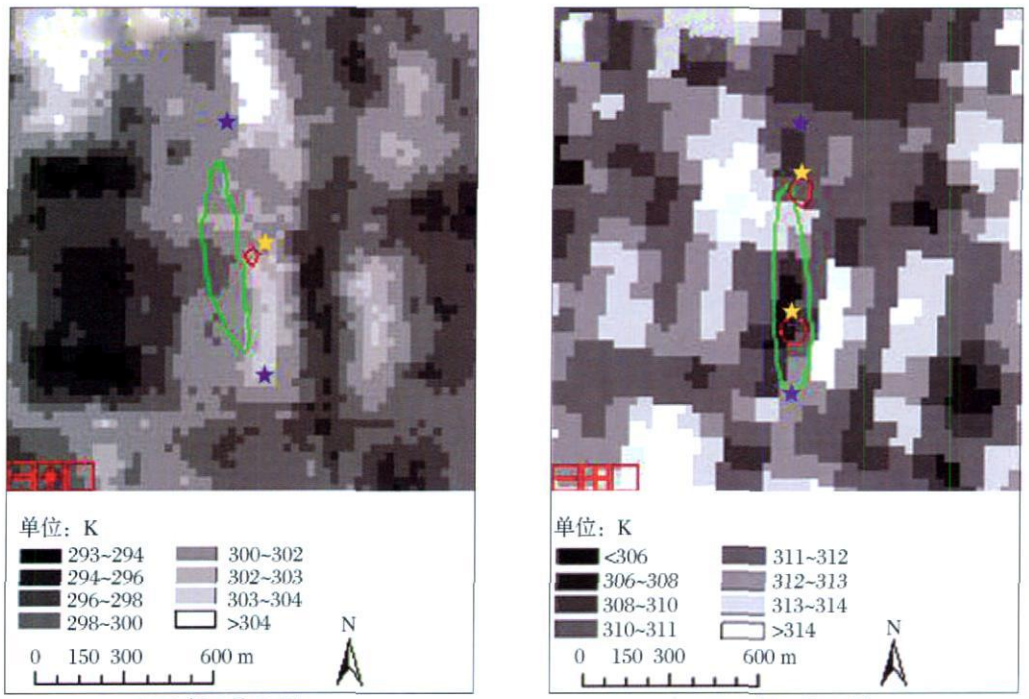
2002 年 4 月 12 日　　2004 年 6 月 12 日

图 1　小汤山实验场的 TM(2002)和 ASTER(2004)可见光波段假彩色合成图

Fig. 1　TM (2002) and ASTER (2004) images of the experimental fields

图中五星为涡动相关仪位置,梯形为 LAS 的发射端和接收端

Star stands for the location of EC, trapezoid stands for the location of LAS transmitter and receiver



2002 年 4 月 12 日　　2004 年 6 月 12 日

图 2　卫星过境时刻,涡动相关仪和 LAS 的源区与地表温度遥感影像图的叠加

Fig. 2　The remote sensing images of surface temperature and LAS and EC footprint superposed

图中蓝色五角星为 LAS 的发射端和接收端,黄色五角星为涡动相关仪观测点,绿线为 LAS 源区范围,红线为涡动相关仪源区范围

Blue star stands for the location of LAS transmitter and receiver, yellow star stands for the location of EC, green and red isopleths stand for source areas of LAS and EC respectively

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

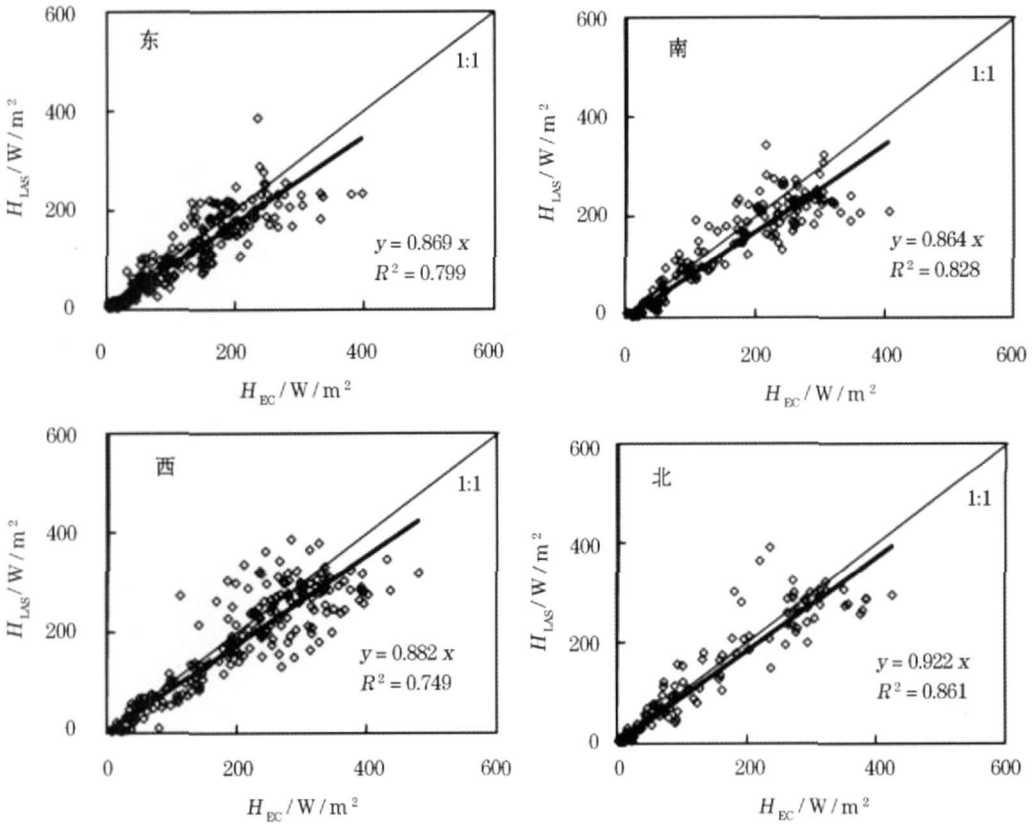


图 3　2002年 4个风向上的 H_{LAS}、H_{EC}散点图

Fig 3　Comparison of H_{LAS} and H_{EC} at different wind directions in 2002

4 3　非均匀下垫面 (**2004**小汤山)

将 2004年小汤山南、北涡动相关仪观测的显热通量值 (H_{ECS}, H_{ECN})分别与 LAS观测值 H_{LAS}进行拟合分析, 结果列于表 3。在非均匀地表上, EC 和 LAS观测显热通量的一致性明显差于 2002年均匀地表的情况。除了南边涡动相关仪在北风方向上与 LAS观测值的变化趋势一致性较好外 (R^2 = 0. 912), R^2普遍偏低。尤其在南风方向上, 南、北涡动相关仪与 LAS观测值之间散点明显, R^2仅 0. 2左右。分别对南北涡动相关仪和 LAS源区的重叠区域仿照上一节进行统计 (图 4), 结果列于表 4。

表 3　东南北 3个风向上南、北涡动相关仪分别与 LAS观测通量值的拟合结果

Table 3　The fitted equations between EC and LAS at different wind directions

	南边 EC & LAS		北边 EC & LAS	
东风	H_{LAS}= 0. 713H_{ECS},	R^2= 0. 516	H_{LAS}= 0. 784H_{ECN},	R^2= 0. 349
南风	H_{LAS}= 1. 028H_{ECS},	R^2= 0. 247	H_{LAS}= 1. 034H_{ECN},	R^2= 0. 190
北风	H_{LAS}= 0. 696H_{ECS},	R^2= 0. 912	H_{LAS}= 1. 082H_{ECN},	R^2= 0. 704

表 4　不同风向上南、北涡动相关仪和 LAS源区比较

Table 4　Comparison of source areas between EC and LAS at different wind directions

	EC、LAS源区范围比较	东风	南风	北风
南边	重叠网格数	9	13	22
EC& LAS	足迹权重比	9%	12%	10%
北边	重叠网格数	8	9	22
EC& LAS	足迹权重比	5%	5%	8%

表 5　不同风向上 LAS源区范围落在南北实验场的足迹值百分比 (%)

Table 5　Footprint ratio of LAS in the northern and southern experimental field at different wind directions

	东风	南风	北风
南边实验场	47	67	24
北边实验场	53	33	76

从表 4可见, 对于南北涡动相关仪, 均是北风向上涡动相关仪与 LAS的源区重叠面积最大。而在这个风向上, 涡动相关仪与 LAS观测值的一致性是 3个风向上最好的 (南边, R^2 = 0. 912, 北边, R^2 =

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0. 704)。南边涡动相关仪南风方向上源区重叠足迹权重比最大,而该风向上的拟合系数也在 3个风向中最接近 1。北边涡动相关仪北风方向上源区重叠足迹权重比最大,而在该风向上得到的拟合系数接近于 1,虽然南风向上的拟合系数更接近 1,但 R^2 仅 0. 190,这个近于 1的拟合系数意义不大。再参照表 5,南风时, LAS的源区范围有 67% 在南边实验场,即 LAS的通量贡献区域绝大部分来自南边实验场,而南边涡动相关仪的通量贡献区域全部在南边实验场 (图 4), 该风向上南边涡动相关仪与 LAS观测值的拟合系数接近 1; 北风时, LAS源区范围有 76% 在北边实验场, LAS的通量贡献区域绝大部分来自北边实验场,而北边涡动相关仪的通量贡献区域全部在北边实验场 (图 4), 而该风向上北边涡动相关仪与 LAS观测值的拟合系数接近 1。R^2最小值出现在南风时的北边涡动相关仪和 LAS观测值的拟合。此时,北边涡动相关仪与 LAS源区重叠网格数仅为 9,足迹权重比仅 5% (表 4), 且 LAS的源区落在北边实验场的比例仅为 33% (表 5)。两者的源区重叠度最差,差异最大。东风时, LAS源区基本

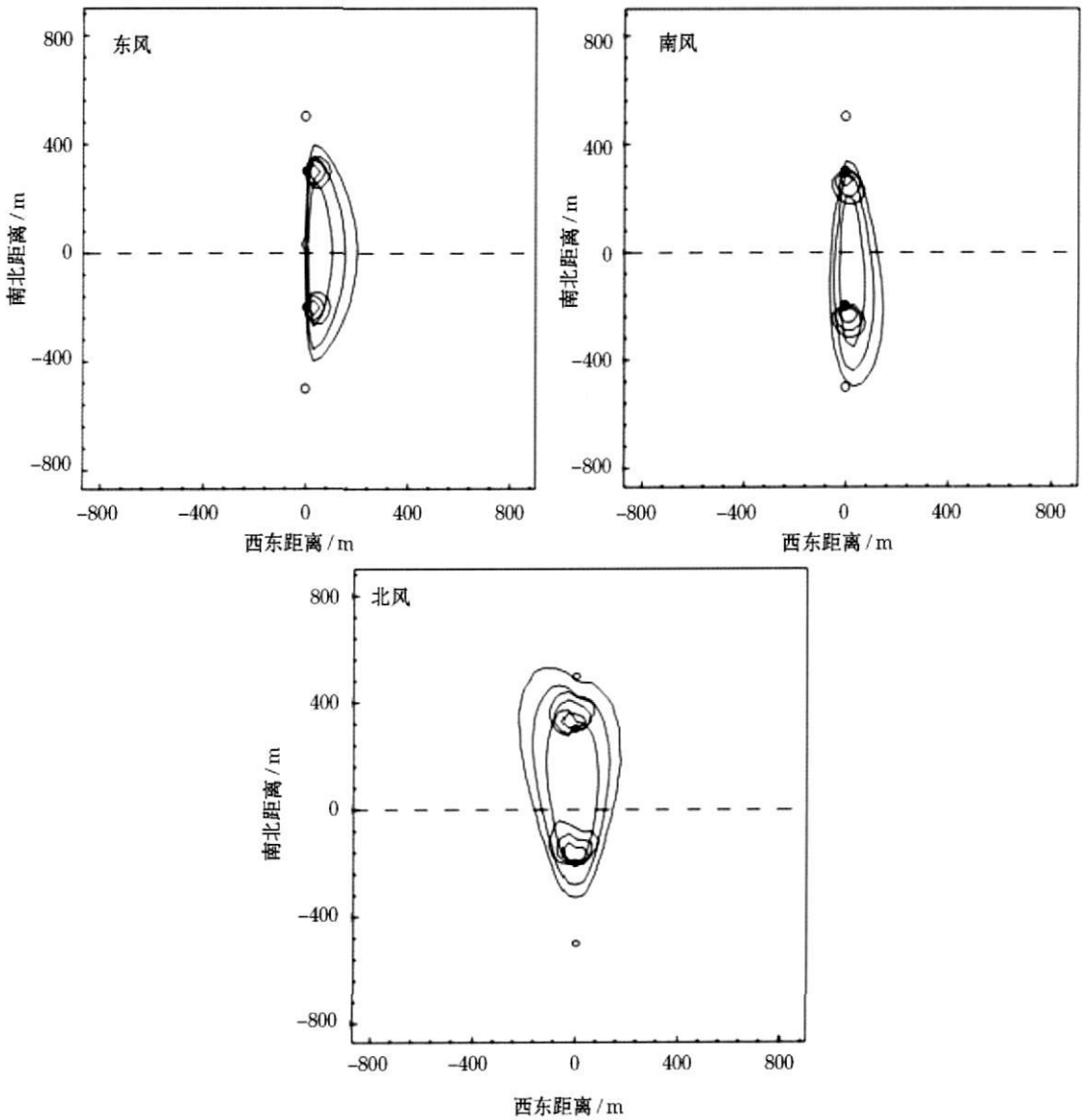


图 4 研究时段内, 3个风向上涡动相关仪和 LAS的源区图

Fig 4 The footprint of EC and LAS

图中白圈表示 LAS发射端和接收端,黑圈表示 2台涡动相关仪的测点位置,虚线表示南北实验场的分界线

White circle stands for the location of LAS transmitter and receiver; black circle stands for the location of EC, dotted line stands for the border between the northern and southern experimental fields

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在南北实验场各占一半 (表 5), 此时南边涡动相关仪与 LAS的源区重叠度要好于北边涡动相关仪 (表 4), 因此与 LAS观测值的共变趋势好于北边涡动相关仪 (南边: $R^2 = 0.516$, 北边: $R^2 = 0.349$)。但两者的拟合系数接近。

总之, 在非均匀地表上, 涡动相关仪和 LAS观测显热通量的一致性大小, 与 2个仪器的源区重叠区域大小相关, 而 2个仪器测量值的差异, 则与重叠区域内足迹权重比值大小、LAS源区范围落在对应涡动相关仪所在组分地表的比例相关以及地表的非均匀程度有关。

5　非均匀地表上观测通量的尺度关系

2004年实验场是由 2个面积基本相等、地表状况差异较大的区域 (北面杂草地, 南面裸地)组成的混合地表。南北架设的 LAS的光径的中点基本上与划分南北区域的中间小路重合, 光径一半经过杂草地, 一半经过裸地。南北 2套涡动相关仪的位置基本在 LAS光径路线上, 距离 LAS光径中点分别约为 200和 300 m。按照 LAS权重系数的特点, 越在光径中间的地表, 对测量值的影响越大; 而在接近发射仪和接收仪端, 影响越小。南北涡动相关仪位置处的权重系数分别为 $W_S = 0.062$ 和 $W_N = 0.031$, 即南边为北边的 2倍。根据 3个风向上南北涡动相关仪观测值与 LAS观测值拟合的结果, 一致有南边的 R^2 明显大于北边 (表 3)。

5.1　掺混高度

掺混高度 (Z_b)这个概念由 Wieringa[15] 引入, 其可以看作这样一个高度, 即在 Z_b 之上, 地表各组分或地表扰动的影响逐渐消失。对于水平非均匀尺度远远小于 10 km的 2004年小汤山实验场, 主要是近地面层的底部受到地表非均匀的影响。而在近地面层以上, 会形成一个充分发展的行星边界层, 在该层可观测到一个平均的地表水热通量。而安装在掺混高度以下的传感器, 观测到的通量来自各个组分。

本文根据 Wood等[16]的公式计算东南北 3个风向上每 10 min掺混高度, 该公式是平均风速、摩擦速度以及水平非均匀尺度的函数。Z_b 值的范围在 4 ~ 20 m。绝大部分时刻, LAS光径在掺混高度以上 (东南北 3个风向, Z_{LAS}在掺混高度以下样本占该风向上总样本的比例分别为 8.5%、6.25% 和 11.7%), 而 2台涡动相关仪的观测高度总在 Z_b 以下。即 LAS观测的是南北混合区域的总体显热通量, 2台涡动相关仪的观测则分别代表南北区域裸地和杂草地的显热通量。将 3个风向上 LAS观测的显热通量值与对应时刻 2台涡动相关仪观测显热通量值的均值作散点图, 除了南风方向散点分布在 1∶1线两侧, 东风和北风方向均偏离 1∶1线; 另外南风方向散点分散明显, R^2 仅 0.525。因此, LAS观测显热通量与 2台涡动相关仪观测值之间并不存在简单的算术平均关系。

5.2　不同风向上 H_{LAS}、H_{EC}的尺度关系

基于以上分析, 在确定 LAS观测值与 2台涡动相关仪观测值的关系时, 考虑 2个因素:

(1) LAS源区在南北区域的大小。

(2) 2台涡动相关仪在 LAS光径上的位置。由此构建如下尺度关系式:

$$H_{EC_N_S} = \frac{\frac{W_S}{W_{max}} f_S}{\frac{W_S}{W_{max}} f_S + \frac{W_N}{W_{max}} f_N} H_{ECS} + \frac{\frac{W_N}{W_{max}} f_N}{\frac{W_S}{W_{max}} f_S + \frac{W_N}{W_{max}} f_N} H_{ECN} \quad (1)$$

其中, f_S、f_N是 LAS源区在南北区域内的足迹百分比, W_{max}是 LAS光径中点处的权重系数, $H_{EC_N_S}$是根据涡动相关仪观测值得到的南北混合区域的总体显热通量值。将 $H_{EC_N_S}$与 LAS观测值 H_{LAS}比较, 结果如图 5。

南北风向上, $H_{EC_S_N}$与 H_{LAS}拟合系数非常接近于 1, 但在东风向上, 拟合系数仅为 0.764。计算南北涡动相关仪源区与 LAS源区重叠区域内 LAS足迹值和 (sum_s, sum_n)各占南北区域内 LAS源区范围内足迹值和 (sum_LAS_s, sum_LAS_n)的比值 (所有样本中, 2台涡动相关仪的源区均未有相交, 或越过南北区域中间界限的情况), 东风方向上比值最小, 涡动相关仪与 LAS的源区重叠度最小, 北风向最大 (相关系数 R^2最大)。即东风向上, 2台涡动相关仪观测的裸地和草地的显热通量, 相较于 LAS观测的混合地表的显热通量, 由于各自观测地表范围差异大, 使其之间的共性小。根据研究时段内 3个风向上 f_S、f_N的逐时刻变化, 以及 3个风向的仪器源区图, 南 (北)风向时, LAS的源区主要在南面 (北面)实验场, 南面 (北面)区域是影响 LAS观测值的主要贡献区域。即南北风时, 南边的裸地和北边的杂草地对 LAS观测值的贡献大小不同。但东风时, LAS源区基本上均匀对称分布在南北实验场, f_S、f_N

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

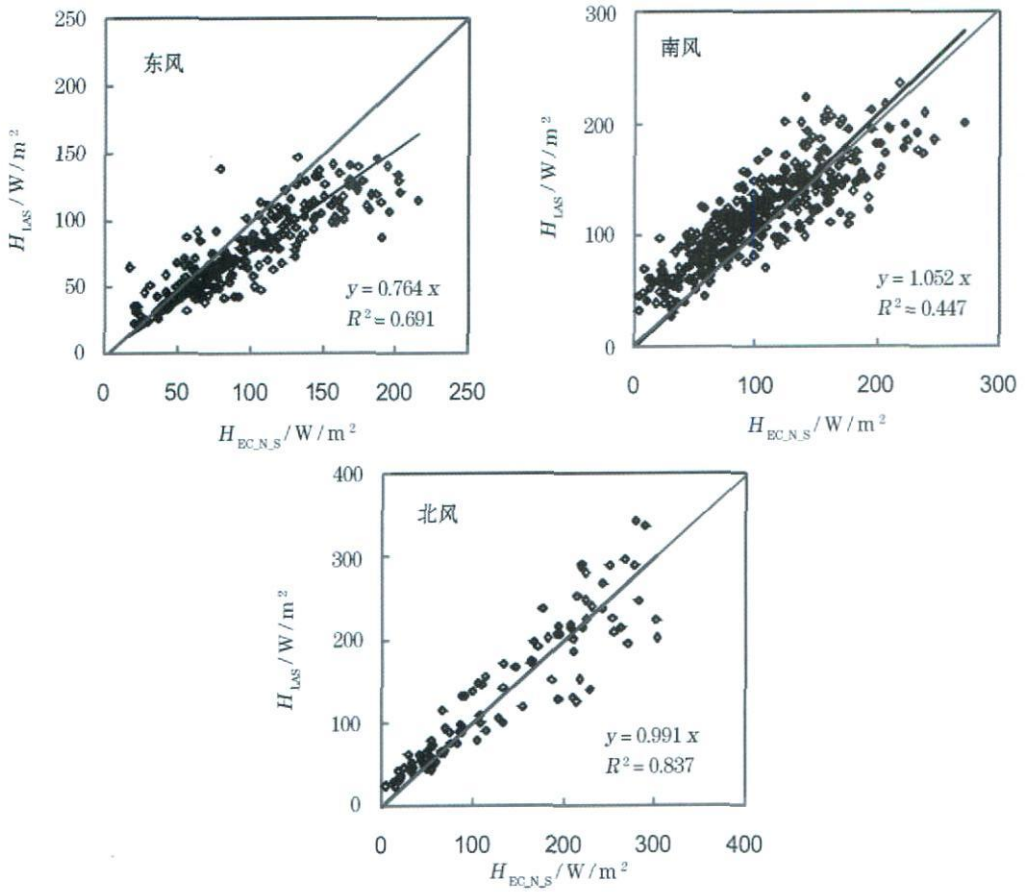


图 5 3个风向上 LAS观测值与利用 2台涡动相关仪计算的混合地表的显热通量值比较

Fig 5 Comparison of H_{LAS} and $H_{EC_N_S}$ at different wind directions

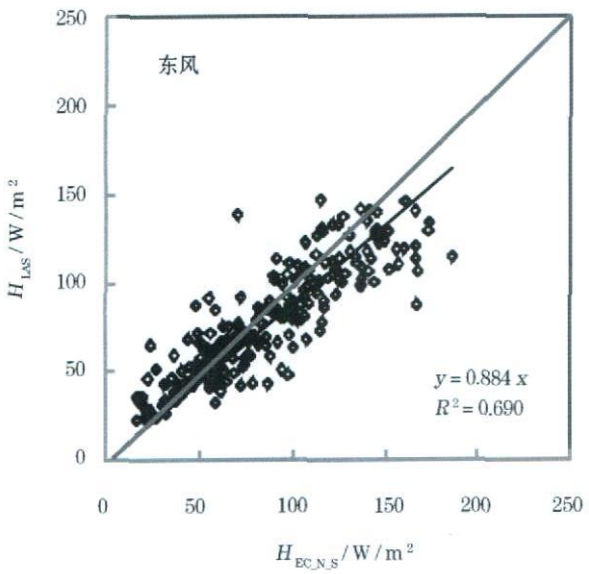


图 6 东风向上修正后的 $H_{EC_N_S}$与 LAS观测值 H_{LAS}的比较

Fig 6 Comparison of H_{LAS} and corrected $H_{EC_N_S}$ at east wind direction

值在 0.5上下波动, 南北区域对 LAS观测值的贡献可认为相等。此时, 前面提及的 2个因素之一: LAS源区在南北区域的大小可以忽略, 仅考虑另一因素: 2台涡动相关仪在 LAS光径上的位置。方程 (1)修正为:

$$H_{EC_N_S} = \frac{W_S}{W_{max}} H_{ECS} + \frac{W_N}{W_{max}} H_{ECN} \qquad (2)$$

利用 (2)式计算的东风方向的 $H_{EC_N_S}$与 H_{LAS}比较 (图 6), 拟合系数上升为 0.884, R^2 基本不变。此时两者仍有 10% 左右的差异, 但方程 (2)以简单明了的形式, 给出了东风向上 2台涡动相关仪与 1台 LAS观测值之间的关系。综合 3个风向, LAS的路径权重函数对观测显热通量有重要影响, 当风向为南北时, 2台涡动相关仪的源区范围穿过 LAS光径路线, 能更好捕获光径路线上湍流的运动情况, 拟合系数近于 1。而东风时, 2台涡动相关仪的源区范围在 LAS光径路线一侧, 两者测量值的差异大于南北风时。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6 结论与讨论

足迹模型可定量确定影响仪器观测范围的源区大小。本文借助解析足迹模型, 研究均匀、非均匀下垫面上涡动相关仪与大孔径闪烁仪观测显热通量之间的差异与关系。根据计算发现, 通量贡献 80%、90%源区等值线之间的区域在面积上占很大比例 (40% ~ 60%), 但是对通量观测贡献仅 10%, 本文取 80%的源区范围作为对仪器观测有影响的区域。

实验场内地表温度的空间变化对显热通量有重要影响。即地表的均匀与非均匀性质, 直接影响 EC 和 LAS观测的显热通量的差异大小。在均匀地表上, EC和 LAS源区的重叠程度, 决定了 2个仪器测量值的变化趋势, 以及测量值的差异。利用足迹模型, 根据 2004年实验中涡动相关仪和 LAS位置特点, 构建了非均匀地表上 2台涡动相关仪与 1台 LAS观测的显热通量之间的尺度关系式。这个尺度关系式在不同风向上有所不同, 但是均表明: 在非均匀地表上, 涡动相关仪和 LAS观测显热通量的差异, 与 2个传感器的位置 (涡动相关仪与 LAS光径路线中点的距离)和 LAS源区在各种组分地表的足迹比重直接相关。

需要指出的是, 涡动相关仪由于仪器观测偏差、源区不同与储存项被忽略以及大尺度涡旋的影响等原因, 存在能量不闭合问题 [17], 这也是造成涡动相关仪和 LAS测量值差异的原因之一。本研究中, 对涡动相关仪的能量闭合问题不作深入探究。

参考文献 (References):

[1] Andr J C, Bougeault Ph, Goutorbe J P. Regional estimates of heat and evaporation fluxes over non-homogeneous terrain: examples from the HAPEX-MOBILHY program [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 50: 77-108.

[2] Mahrt L, Vickers D, Sun J, *et al*. Calculation of area-averaged fluxes: Application to BOREAS [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40: 915-920.

[3] Foken T, Neisser J, Richter S H, *et al*. The LITFASS´project of the German weather service[C]// 12th Symposium on Boundary Layer and Turbulence. Vancouver: American Meteorology Society, 1997: 567-568.

[4] 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.

[5] Lagouarde J P, Bonnefond J M, Kerr Y H, *et al*. Integrated sensible heat flux measurements of a two-surface composite landscape using scintillometry [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, 105: 5-35.

[6] Peng Guliang, Liu Shaomin, Cai Xuhui, *et al*. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(5): 1 064-1 070. [彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭辉, 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.]

[7] Halldin S, Gryning S E, Gottschalk L, *et al*. Energy, water and carbon exchange in a boreal forest landscape-NOPEX experiences [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, (98/99): 5-29.

[8] Mahrt L, Vickers D, Sun J, *et al*. Calculation of area-averaged fluxes: Application to BOREAS[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40: 915-920.

[9] 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.

[10] Beyrich F, Leps J P, Mauder M, *et al*. Area-averaged surface fluxes over the LITFASS region based on eddy-covariance measurements [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2006, 121: 33-65.

[11] Chávez J L, Neale C M U, Hipps L E, *et al*. Comparing aircraft-based remotely sensed energy balance fluxes with eddy covariance tower data using heat flux source area functions [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2005, 6: 923-940.

[12] 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, 蔡旭辉, 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: 自然科学版, 2007, 43(6): 822-827.]

[13] Huang Miaofen, Liu Shaomin, Liu Suhong, *et al*. A study of the difference between true surface temperature and radiometric surface temperature [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(10): 1 075-1 082. [黄妙芬, 刘绍民, 刘素红, 等. 地表温度和地表辐射温度差值分析 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(10): 1 075-1 082.]

[14] Qin Zhihao, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, *et al*. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from landsat TM 6 data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(4): 456-466. [覃志豪, Zhang Minghua, Arnon Karnieli, 等. 用陆地卫星 TM6数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.]

[15] Wieringa J. An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, 1976, 102: 241-253.

[16] Wood N, Mason P J. The Influence of static stability on the effective roughness lengths for momentum and heat transfer [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, 1991, 117: 1 025-1 056.

[17] Foken T. The energy balance closure problem: An overview [J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1 351-1 367.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

The Scale Relationship of Sensible Heat Flux Measured by Large Aperture Scintillometer and Eddy Covariance System

LU Li[1,2], LIU Shaomin[2], XU Ziwei[2], BAI Jie[2], WANG Jiemin[3]

(1. Meteorological Information Center of Beijing, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089, China; 2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: With the flux data observed by Eddy Covariance system (EC) and Large Aperture Scintillometer (LAS) at Xiaotangshan (Changping district, Beijing) in 2002 and 2004, and based on an analytical footprint model, the scale relationship of sensible heat flux between EC and LAS measurement was analyzed. The results showed that the level of surface homogeneity or heterogeneity had a direct influence on the sensible heat flux difference measured by eddy covariance system and large aperture scintillometer. After analyzing the relationship between flux differences of EC and LAS observation and the footprint ratio and size ratio of overlap zone of source areas of the two sensors over homogeneous and heterogeneous surfaces, a scale transfer equation was constructed to composite the sensible heat flux measured by eddy covariance system at each patch into the area-averaged sensible heat flux.

Key words: Sensible heat flux; Eddy covariance system; Large aperture scintillometer; Scale

全球最大风电项目获得美国能源部计划支持

日前,美国能源部(DOE)宣布: DOE将有条件地承诺为全球最大风力发电厂——凯斯内斯 Shepherds Flat风力发电厂建设所需的 13亿美元贷款提供部分担保。

该项目的目标是在美国俄勒冈州(Oregon)东部建设一个845兆瓦的风力发电设施,最初由凯斯内斯能源公司(Caithness Energy)和通用电气(GE)能源金融服务公司投资建设。这将是美国北部地区建成的首个风力发电厂。

建成后的风力发电厂,将装备由 GE公司生产的 338台 2.5xl型风力涡轮发电机(该型号风力涡轮发电机此前已经在欧洲和亚洲地区投入使用),实现并网发电;预计每年会减少二氧化碳排放 120多万吨,相当于 21万余辆客运车辆一年的温室气体排放量;同时,项目将创造 400个建造工作岗位和 35个永久性现场工作岗位。此前,美国政府曾经承诺到 2012年将可再生能源的生产翻倍,这一风力发电项目可以看作是该承诺的部分兑现。

凯斯内斯 Shepherds Flat项目是目前全球最大的风力发电项目,美国 DOE对其支持基于 DOE"金融机构合作伙伴计划"(FIPP,该计划为美国《复苏与再投资法案》专门资助项目)。对于金融机构向可再生能源项目提供的贷款, DOE在 FIPP计划的融资额度内将最多担保总额的 80%。截至目前,依托该计划, DOE已经为 15个洁净能源项目提供了总额达 159亿美元的贷款担保或有条件承诺贷款担保。

(王立学 译 张树良 校)

原文题目: Department of Energy Offers Conditional Commitment for a Loan Guarantee to Support World's Largest Wind Project

来源: http://www.energy.gov/news/9676.htm

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net