

文章编号:1001-8166(2010)11-1237-11

大孔径闪烁仪观测数据在陆面模式验证中的应用初探^{*}

李 远, 孙 睿^{*}, 刘绍民, 徐自为, 白 洁

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

摘 要:将大孔径闪烁仪(LAS)观测数据应用在陆面模式验证中对更好地认识和描述陆面过程在气候变化中的作用有着重要意义。以中国北方2个LAS观测站——密云和阿柔为例,分别设定一个公里尺度(1 km²)的研究区域,采用陆面模式SiB2,综合利用站点观测数据、实地调查数据及卫星遥感数据,对陆面过程进行了模拟,并利用LAS和涡动相关仪(EC)观测的显热通量对模拟结果进行了评估,结果表明:SiB2模式能够对阿柔和密云显热通量的总体情况、日变化情况及季节变化情况进行较好的模拟;利用LAS显热通量进行较大尺度模拟验证,能够在很大程度上避免EC能量不闭合及其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。

关 键 词:SiB2;大孔径闪烁仪;涡动相关仪;模式验证

中图分类号:P404

文献标志码:A

1 引 言

陆面过程是发生在陆气之间的物质、能量和动量交换过程,是地球系统的基本物理生化过程之一,对大气环流和气候变化有着重要影响^[1]。陆面模式作为陆面过程的参数化描述,为大气和气候模式提供下边界条件。从Manabe等^[2,3]在大气环流模式(GCM)中引入陆地水文循环,建立箱式模型起,陆面过程模式相继经历了以BATS^[4]和SiB^[5]为代表的基于“大叶”理论和强迫—恢复方程^[6]的物理模式,以及以LSM^[7]、SiB2^[8]和CLM^[9]为代表的考虑生物化学机制和碳循环作用的生化模式的发展历程,陆面模式在区域和全球气候预报以及气候变化研究中的重要性逐渐受到重视。

随着模式模拟精度的提高及其应用需求的发展,对模式的验证也有了更高的要求。地表水热通量是陆面模式为大气和气候模式提供的重要变量,

是模式验证中的重要部分。涡动相关仪(EC)能够较准确地对地—气间湍流交换进行连续的直接观测,在工程设计和数据处理上已经相对成熟,在目前的地表通量模拟验证中应用最为广泛^[10~13]。然而EC是单点观测,其空间代表性仅在百米量级,与模式区域应用的尺度(几公里至上百公里)有较大差异,另外,由于其观测范围的限制,往往缺乏捕捉较大尺度涡流的能力,通常存在能量不闭合现象^[14]。大孔径闪烁仪(LAS)是通过测量发射端和接收端之间的大气对发射波束的折射来推算光径路线附近一定范围内的显热通量。它相对于EC主要具有三大优点:第一,观测尺度大,光径长度通常在1~5 km之间,超大孔径闪烁仪甚至达几十公里^[15],这使得其观测尺度与模式区域模拟的尺度更为接近;第二,LAS更容易观测到大尺度涡旋以及湍流有组织结构等,避免单点观测(如涡动相关仪)的不确定性^[14,16];第三,EC观测的足迹(footprint)随风向和

^{*} 收稿日期:2010-03-16;修回日期:2010-07-14.

^{*} 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“遥感数据与植被生态系统碳循环模型的同化研究”(编号:40971221);欧盟FP7 CEOP-AEGIS项目“Coordinated Asia-European long-term observing system of Qinhai-Tibet plateau hydro-meteorological processes and the Asian-monsoon system with ground satellite image data and numerical simulations”(编号:FP7-ENV2007-1 Grant no. 212921)资助。

作者简介:李远(1985-),男,四川成都人,硕士研究生,主要从事水文气象遥感方面研究。E-mail:liyuan_q@126.com

^{*} 通讯作者:孙睿(1970-),男,甘肃通渭人,教授,主要从事植被生产力与地表通量的遥感应用研究。E-mail:sunrui@bnu.edu.cn

大气稳定性的变化较大,而 LAS 观测的足迹则相对稳定^[16]。因此,如何将 LAS 观测数据应用到模式验证当中是当前通量观测研究的一个热点。

陆面模式在区域尺度的模拟存在许多不确定性,如驱动数据、输入参数的不确定性等,利用观测站点的实测数据在田间尺度进行单点模拟往往更加可靠。为了研究 LAS 在陆面模式验证中的应用潜力,首先利用 LAS 观测的显热通量对单点模拟进行验证分析更有利于排除模式本身过多的不确定性,更好地分析 LAS 观测在陆面模式验证中的适用性,从而为进一步探讨 LAS 在区域模式模拟验证中的应用潜力奠定基础。

本文采用国际认可度较高的陆面模式 SiB2,考虑了输入数据的空间代表性问题,在密云和阿柔 2 个观测站进行了在尺度上能够接近区域模式应用情况的单点模拟实验。利用 LAS 显热通量对模拟结果进行了验证,并对 LAS 在尺度和能量闭合上的优势(相对于 EC)在模式验证中所体现出的效果进行了定量分析。

2 数据与方法

2.1 研究区域及观测介绍

阿柔观测站在“黑河流域遥感—地面观测同步试验”支撑下建立^[17],观测站位于青海省祁连县中东部地区的阿柔乡草大板村瓦王滩牧场,黑河上游支流八宝河南侧的河谷高地上。观测站周围地势平坦开阔,下垫面是覆盖均一的草地,南北两侧约 3 km 外是连绵的山丘,符合大气边界层近地层理论中水平均匀下垫面的要求,是陆面模式模拟验证的良好试验场。密云观测站是北京师范大学在“全球环境基金”等项目的支撑下,在北京市密云县新城子镇建立的微气象及地表通量观测站^[15]。与阿柔观测站相比,密云站的气候条件相对优越,但下垫面非常复杂。观测站处于一条宽度约 500 m、长度约 2 400 m 的东北—西南走向山谷中。谷内是河漫滩地,地势平坦,在当地居民的耕作下,形成以李子树和苹果树为主的果园和以玉米为主的耕地。河漫滩地的西北部及东南部分布有居民地,山谷四周是连绵的山丘。因此,观测站四周的地形、土地利用类型、植被种类和盖度等都比较复杂,尺度问题在该区域更为突出。表 1 给出了研究区域的主要特征参数。

两站的观测仪器都包括 3 个部分:自动气象站、涡动相关仪(CSAT3&Li7500, Campbell, 美国)和大

孔径闪烁仪(阿柔: BLS450, Scintec, 德国;密云: Kipp&Zonen, 荷兰)。两站的 LAS 光径均呈东北—西南走向(图 1),阿柔站 LAS 光径长度为 2 390 m,密云站 LAS 光径长度 2 420 m。自动气象站和 EC 搭建在 LAS 发射端和接收端之间,距接收端约 1/3 光径长度处(图 1)。自动气象站观测项目包括风速、风向、空气温度、空气湿度、气压、降水量、辐射平衡四分量、土壤热通量以及土壤温度与水分梯度。表 2 给出了一些关键的观测高度。

2.2 SiB2 模式

2.2.1 模式介绍

SiB2 是 Sellers 等^[8, 18]和 Randall 等^[19]在 SiB 基础上发展的陆面模式,综合应用地球生物圈的植被物理学、生物气候学和辐射传输的研究成果,改善了模式对植被的生物物理交换过程的模拟能力;将 SiB 的 2 层植被冠层结构简化为单层,方便了遥感数据在模式中的应用,同时引进冠层光合传导模式,对植被中的 CO₂及水汽传过程进行描述。

表 1 研究区域基本情况		
Table 1 The basic circumstances of research area		
	阿柔	密云
经纬度	38°02'39.8"N, 100°27'52.9"E	40°37'50.8"N, 117°19'23.8"E
海拔/m	3 030	360
气候类型	青藏高原气候	温带季风气候
年均气温/℃ *	1.5	11.5
年均降水/mm *	417	625
主导风向	东南风	北风
土地覆盖	草地	果园, 耕地, 居民地, 林地
土壤质地	壤土	沙壤土
* 为中国地面气象站(祁连站、密云站)1989—2008 年观测值的多年平均		

表 2 主要仪器架设高度 /m		
Table 2 The observation heights of different instruments		
观测高/深度	阿柔	密云
自动 气象站	温湿度	2.07, 10.04 *
	风速	10.66 *, 30.56
	辐射四分量	10.66 *, 30.56
	土壤温湿度	30.76
		-0.05, -0.1, -0.2, -0.4, -0.6, -0.8 **, -1.0
EC	3.15	26.66
LAS ***	9.5	35.86
* 为模拟所采用数据的观测高度; ** 密云站 0.8 m 深处只有温度观测; *** 为 LAS 观测的有效高度		

SiB2 是目前世界上在理论和应用上最为成熟

的模型之一,有许多研究对其进行过不同区域的验证和评价^[11, 13, 20~22]。模式的输入数据主要包括植被参数、土壤参数、地形参数、初始化变量和气象驱动数据等,模式可模拟估算陆面能量、水分及 CO₂ 交换过程中的各状态变量。具体的参数化和参数设置方案参见文献[8, 18, 19]。

SiB2 模式中的冠层阻抗参数化方案需要一系列空气动力学参数,而这些参数在 SiB2 里面采用基于 K 理论的模型计算,这种算法与传统的混合长度理论并不一致,因此其在叶面积指数(LAI)非常低的情况下计算出的空气动力学粗糙度会低于裸露地表的空气动力学粗糙度,这与实际矛盾^[11]。本文采用 Watanabe 等^[23]在 1990 年发展的基于混合长度理论的算法来计算 SiB2 阻抗参数化方案所需要的空气动力学参数。模型的改进见文献[11]。

2.2.2 模式模拟的尺度

SiB2 本质上是一维模式,其模拟尺度取决于输入数据的尺度。在区域应用中,模式模拟的尺度即为网格大小,一般为几公里至几十公里。

在单点模拟中,输入数据的空间代表性往往不太一致。向下短波辐射、向下长波辐射、风速、降水、气温及空气湿度等气象驱动数据一般采用气象站观测数据,能够代表一个较大范围的情况(几公里左右);土壤特征参数一般根据土壤类型或者实地测量数据给出,土壤类型往往是一个较大范围的平均

状况,若采用实地测量数据,则跟实地抽样所覆盖的范围有关;土壤温湿度通常根据实测数据进行初始化,因此其空间代表性与观测仪器分布有关;植被参数中光谱参数、生理学参数以及形态学参数等相对比较固定,但植被覆盖度、LAI 等往往差异很大。因此,单点模拟的尺度往往与植被覆盖度、LAI 等参数的尺度关系最密切,同时与土壤参数的尺度也有关系。

当前的模式研究越来越多地用到遥感数据,例如 SiB2 将 SiB 的 2 层植被模型简化成单层植被模型很大程度上就是为了更好地利用遥感数据所反映出的植被信息^[8, 19]。陆面模式研究中应用较多的遥感数据的空间分辨率多在公里级别,例如 MODIS 的 NDVI、LAI 产品空间分辨率是 1 km,AVHRR 的全球覆盖指数和全球植被指数分辨率分别为 4 和 15 km。如前所述,常规气象站或自动气象站的观测数据往往能代表一个较大范围,因此在使用气象站数据和遥感数据进行模拟时,模拟的尺度往往就取决于遥感数据的尺度。

2.3 参数设置与数据处理

为了让本单点模拟实验的尺度更加逼近区域模式模拟情况,同时让模拟的尺度与 LAS 观测尺度更加一致,本文选取 LAS 光径路线上最中间的 MODIS LAI 像元(1 km²)为模拟基本范围,所有参数都以该范围为基准进行设定。MODIS 像元与自动气象站、EC 及 LAS 的位置关系如图 1 所示。

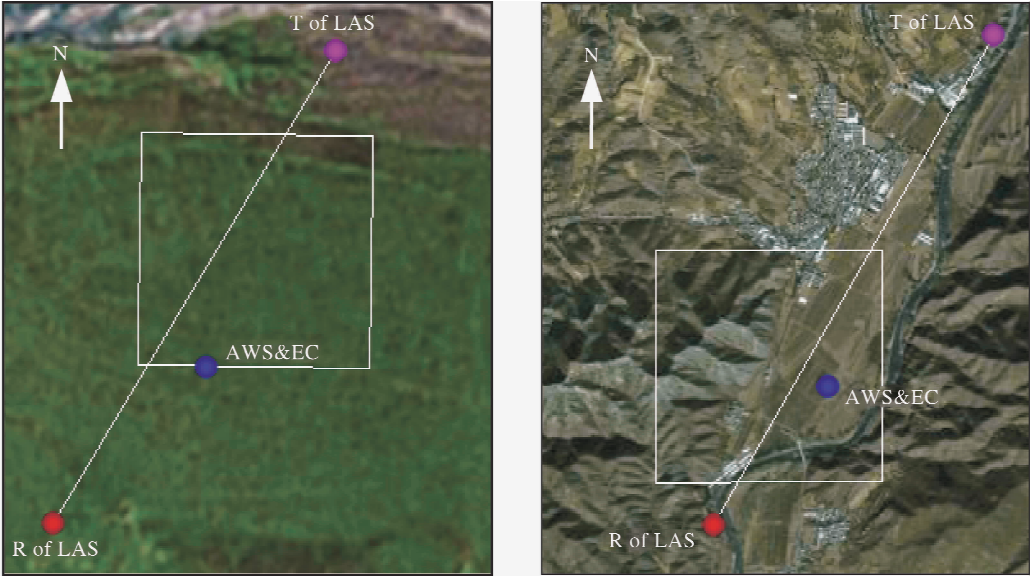


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Study area

左为阿柔站,右为密云站;白框为 MODIS LAI 像元范围;T of LAS 为 LAS 发射端,R of LAS 为 LAS 接收端
The left figure is Arou and the right one is Miyun. The white boxes are the interested area of one MODIS LAI product pixel.
T and R of LAS refer to the transmitter and receiver of Large Aperture Scintillometer respectively

2.3.1 植被参数

植被参数包括形态学参数、光谱参数、生理参数等。

冠层顶高度、冠层底高度、最大叶密度高度、叶片宽度、叶片长度、植被根系深度等植被形态学参数均根据调查估测得到,其中密云下垫面覆盖情况较复杂,本文以乔木(李子树和苹果树)为主要物种进行参数设定。叶面积指数采用经过质量控制的 MODIS LAI 合成的月值,植被覆盖度则是在实地调查基础之上,结合 MODIS NDVI 计算得到月值。这样,其空间代表性即为 MODIS 像元覆盖的范围(1 km²)。

植被光谱参数和生理参数根据植被类型查阅文献[18]得到,阿柔站为类型 6(草地),密云站为类型 2(落叶阔叶林)。需指出,在 SiB2 模式默认参数设置中,植被生长最适温度设定为 25℃,并且设定了各植被类型的生长温度上下限,阿柔草原属于高寒地区,其生长季白天温度很难到达 25℃,而植被在该区域生存必然是适应该地区气候条件的结果,根据敏感性分析实验,本文采用 6~7 月(植被生长最快)白天平均温度作为阿柔站植被生长最适温度,其余生长温度上下限参数按比例进行调整。

2.3.2 土壤参数和土壤初始化变量

土壤参数包括土壤湿度指数、饱和导水度、饱和水势、孔隙度、土壤粗糙度、土壤总深度及表层土壤深度等,前 3 项根据土壤粒度仪测得的土壤质地(阿柔为壤土,密云为沙壤土)查阅文献[18]得到,后 4 项根据实地调查估测得到。

土壤初始化变量包括 3 层土壤水分(表层、根层、深层)和 2 层土壤温度(表层、深层),本文将观测的土壤温湿度在垂直方向上进行分段线性插值,得到温湿度廓线,然后采用算数平均方法求取模式需要输入的初始化变量。

2.3.3 气象驱动数据

模型需输入的气象驱动数据包括向下短波辐射、向下长波辐射、风速、空气温度、空气水汽压、降水等。其中水汽压用饱和水汽压和相对湿度换算,饱和水汽压利用空气温度,采用戈夫-格雷奇(Goff-Gratch)公式计算^[24]。其余数据均由自动气象站直接观测得到。

2.3.4 通量数据

采用英国爱丁堡大学发展的 EdiRe 软件对 EC 数据进行后处理,从原始 10 Hz 数据出发,经过如下处理流程:野点值剔除、延迟时间校正、超声虚温转化为空气温度、坐标旋转(平面拟合法)、空气密度

效应修正(WPL 修正)等,同时,对观测数据进行严格的质量控制,包括阈值检查、摩擦风速检验、湍流强度、湍流相似性规律检验以及湍流的平稳性、发展的充分性、频谱分析等,在此基础上剔除弱湍流数据,最终形成 30 min 显热通量(H)和潜热通量(LE)数据产品^[10]。按($H + LE$)和($R_n - G$)线性拟合斜率计算^[14],阿柔站 6~9 月的能量闭合率为 0.86;密云站为 0.68。其中,净辐射(R_n)由辐射四分量换算,土壤热通量(G)利用土壤温湿资料采用 TDEC^[25]方法求取。

LAS 数据处理是从观测到的空气折射指数结构参数出发,平均得到 30 min 观测值,剔除过饱和数据、降雨时刻数据、信号强度偏弱及弱湍流数据等,再结合 30 min 气象资料(风速、空气温度、大气压、净辐射及降水等),经过一系列迭代运算得到 LAS 的显热通量^[15, 26]。

EC 和 LAS 得到的 30 min 通量数据产品最后都采用算数平均换算成 1 h 产品,以便在验证中使用。

表 3 主要参数及取值
Table 3 The main parameters and their value

参数	阿柔	密云
冠层顶高/m	Z_2 0.2	3.0
冠层低高/m	Z_1 0.02	1.0
土壤深度/m	D_T 1.5	1.5
表层土壤深度/m	D_1 0.04	0.05
根深/m	D_r 0.4	0.8
叶面积指数*	L_T 1.9,3.3,3.3,1.3	1.3,2.5,2.0,1.3
植被覆盖度/%*	V 67,95,94,78	59,74,72,65
光合胁迫高温/K	S_2 300	311**
光合胁迫低温/K	S_4 276	283**
呼吸胁迫高温/K	S_6 313	328**
生长最适温度/K	285	298**
其他植被参数	类型 2(草地)**	类型 6(落叶阔叶)**
土壤参数	类型 3(壤土)**	类型 2(沙壤土)**

* 月均值(6~9 月); ** 参见文献[16]

3 结果分析

如前所述,植被分布的不均一使得模式模拟的尺度更为重要,而植被生长季下垫面差异最大,最利于研究模式的尺度效应。另外,在阿柔和密云都存在不同长短的冻融期,而 SiB2 模式并未对冻融过程在能量平衡中的作用进行参数化^[11]。综合考虑两站的气候和植被生长状况,本文选取 2008 年 6~9 月的数据进行了模拟(时间步长 1 h)和验证分析。

3.1 模拟结果与观测的比较

地表能量平衡是地表吸收的辐射能量再分配的

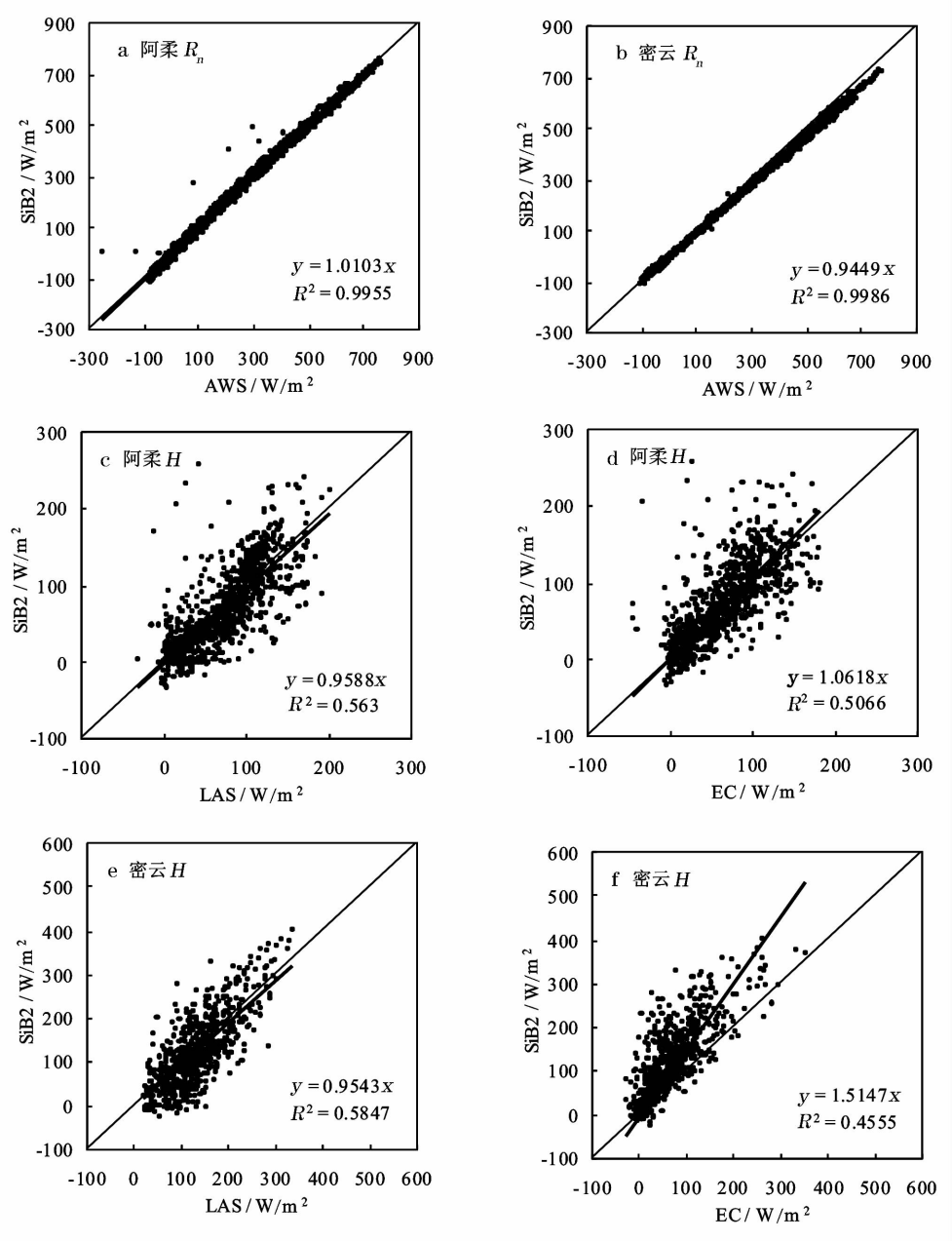


图 2 公里尺度模拟结果与观测的散点图

Fig. 2 Comparison between simulation results at 1 km-resolution scale and observation for net radiation (a, b) and sensible heat flux(c to f)

(白天不稳定层结下数据,a,b 为模拟净辐射与气象站观测的比较,c,e 和 d,f 分别为模拟显热通量分别与 LAS 和 EC 观测的比较)

过程,因此确保净辐射模拟的准确性是对能量分量(显热、潜热和土壤热通量等)进行验证和讨论的基础。从图 2a、2b 可以看出,在阿柔和密云两站模式模拟的净辐射与自动气象站的观测值相关性非常高。线性回归的决定系数(R^2)都达到 0.99 以上,说明模型模拟精度很高。从观测和模拟的回归系数(x 前面的系数)看,阿柔站模拟的净辐射仅存在 1% 的偏高,而密云站则存在 5.5% 的偏低,这可能

与辐射四分量观测仪器架设的位置有关。密云站四分量观测仪架设在李子林边缘,其观测范围涉及果园及耕地,这部分区域植被相对茂密(图 1),而模拟的范围是 MODIS 像元覆盖的区域,其中除果园和耕地而外,还包括一些植被长势较差的山地和没有植被的居民地。植被较差地方的地表温度和反射率相对较高,导致较大的向上长波辐射和短波反射辐射,因此模拟净辐射相对于仪器观测偏低是合理的。

3.1.1 模拟显热通量与 LAS 和 EC 观测值的比较

从观测尺度上讲, LAS 的空间代表性比 EC 大, 与模式模拟更为接近。双喜等^[27]对阿柔站 2008 年观测数据进行足迹分析表明: EC 观测主要通量贡献在距观测塔周边 250 m 环形范围内, 而 LAS 观测主要通量贡献在垂直于光径路线两侧 250 m 的范围内, 光径长度为 2 390 m。宫丽娟等^[28]对密云站 2007 年观测数据进行足迹分析表明: EC 观测主要通量贡献在距观测塔周边 400 m 环形范围内, 而 LAS 观测主要通量贡献在垂直于光径路线两侧 300 m 的范围内, 光径长度为 2 420 m; EC 的足迹主要涵盖果园和耕地, 而 LAS 足迹则涵盖果园、耕地、居民地和林地。因此, 在阿柔和密云站 LAS 观测的尺度与模式模拟的公里尺度更接近, 尤其是在密云站, LAS 对各种下垫面类型的代表性更好。

本文从验证结果上进行了比较。图 2c~f 给出了阿柔和密云两站模拟的显热通量(H)与 LAS 和 EC 观测值的比较。

从图 2c、2e 可看出, LAS 显热通量观测值与模拟结果比较接近, 模拟效果较好。回归系数显示, 阿柔和密云 2 种不同下垫面情况下, 显热通量都存在 4%~5% 的偏低, 这种偏差在模式和观测的精度范围之内, 属正常情况。 R^2 在 0.55~0.60 之间, 这说明模拟显热的变化趋势与观测是基本一致的, 但在部分日期, 总值、变化相位或异常波动上模拟和观测存在差异。从散点分布情况可以看出, 阿柔站存在一些异常值, 而密云站差异过大的情况相对较少, 通过对观测数据的分析, 发现阿柔站 9 月 9 日上午向下短波辐射的观测明显低于前后几天相同时刻的观测值, 甚至出现向上短波明显高于向下短波的情况, 这可能是当时四分量仪受到异常遮挡造成(雪、鸟类等)。该日观测数据的错误是阿柔站模拟出现异常值的主要原因。

从模拟显热与 EC 观测的比较(图 2d、2f)可以看出, 在较大尺度上用 EC 观测来对模拟结果进行验证会带来较大问题。如前所述, EC 的问题主要表现在两方面: 第一, 能量不闭合; 第二, 观测空间范围明显小于模拟范围。这 2 方面问题的严重程度在密云和阿柔两种情况下是不同的。密云站地形和下垫面覆盖条件都更为复杂, 而复杂条件往往增加观测的不确定性: 首先, 复杂地形和下垫面更能诱发较大尺度涡旋、湍流有组织结构等^[14], 而 EC 对这种大尺度涡旋的捕获能力较差, 从而使得能量闭合问题更为突出(密云 6~9 月能量闭合率 0.68, 阿柔

0.86); 其次, 下垫面越复杂 EC 百米尺度观测与模型公里尺度的模拟就越没有可比性。因此, 模拟显热与 EC 观测的比较则显示出图 2d、2f 的结果: 密云站模拟显热高出 EC 观测值 50% 左右, 而阿柔模拟显热相对于 EC 观测仅存在约 6% 的偏差(偏高)。当然, 下垫面复杂情况不同, 模式模拟的精度本身会存在较大的差异, 不能完全归结为观测的不确定性, 但综合 EC、LAS 和模式模拟结果来看, 在阿柔站这种平坦均一的下垫面条件下使用 EC 进行验证可以接受, 在密云这种复杂条件下 EC 对模式的验证则存在很大局限性。另外, 从模拟和观测之间的回归决定系数来看, 模拟显热与 EC 观测之间的回归决定系数(阿柔 0.51, 密云 0.46)低于其与 LAS 观测之间的回归决定系数(阿柔 0.56, 密云 0.58), 因此从总体上讲, 两个站的模拟结果都表现出与 LAS 观测更好的一致性。

3.1.2 日变化

图 3 给出了阿柔和密云在 7 月和 9 月的典型天显热通量日变化情况。

首先从 LAS 和 EC 的验证效果来看, 相对于 EC 观测而言, LAS 显热在绝对大小和变化趋势上都与模型模拟结果更为一致。阿柔站 EC 和 LAS 观测的显热差别较小, 因此从值的大小上看模拟值与 LAS 和 EC 的差别都不大, 但从变化趋势来看, 9 月 24 日模拟显热通量的变化趋势明显与 LAS 数据一致性明显更好, 主要体现为模拟和 LAS 观测都在 16:00 左右突然出现了一个高值。通过查阅该日气象资料, 发现 14:00~16:00 时并没有出现向下长波辐射偏低, 说明不存在瞬时云遮盖情况, 同时该时段无降水记录, 但 16:00 风速突然增强(10.16 m 高风速仪记录显示 5:00~15:00 10 min 平均的风速都在 2.7 m/s 以下, 而 16:00 风速增至 6.0 m/s), 这可能是复杂地形和下垫面覆盖条件诱发了较大尺度涡旋, 而 LAS 相对于 EC 更能捕获这种涡旋^[15]。密云站更能体现出 LAS 在绝对大小上与模式模拟的一致性, 在 7 月 16 日和 9 月 10 日 2 天 EC 显热都明显小于 LAS 观测值, 因此无法用来正确评价模拟精度。

其次, 与 LAS 观测值的比较, SiB2 模型基本能够模拟出显热通量在阿柔站和密云站 2 种下垫面下的日变化趋势。阿柔站 7 月 19 日观测显热通量最大值在 100 W/m² 左右, 模型模拟有所偏高; 9 月 24 日观测显热最大值接近 150 W/m², 模型模拟略有偏低。密云站 7 月 16 日观测显热通量的峰值出现较早, 在 10 时左右, 值在 170 W/m² 左右, 模拟的峰值

明显滞后,出现在 13:00 左右,下午的显热模拟偏大;9 月 10 日的模拟情况则较好,最大值在 200 W/m^2 左右,与观测值比较接近。总的来说模型能够对显热通量的日变化趋势给出较好的模拟。同时,对于 9 月 24 日 16:00 前后阿柔站出现的显热通量高值,模型也能够模拟出来。但模型没有能够模拟出密云站 7 月 16 日 15:00 前后出现的一个显热低值,通过查阅该日气象观测数据,发现向下短波在 15:00 出现了一个低值(14:00、15:00、16:00 的向下短波辐射通量分别为 836.3 、 501.5 、 584.6 W/m^2),而该日并无降水记录,这说明很可能在 15:00 前后出

现了短时的云遮盖,从而导致通量减小。LAS 和 EC 都捕捉到这一低值,模型没有模拟出来,这可能是模拟的时间分辨率(1 h)不够高,不足以很好地模拟出这种短暂变化,也可能与模式本身的局限性有关。

3.1.3 季节变化

图 4 给出了阿柔和密云 2008 年 6~9 月的显热通量月均日变化情况。从观测数据看,在密云站,相对于 EC 而言,LAS 观测的显然通量与模式模拟值吻合更好,而在阿柔站这种差异并不明显。

LAS 观测表明,阿柔站显热通量从 6 月到 9 月基本遵循先下降后上升的变化情况,但变化趋势并

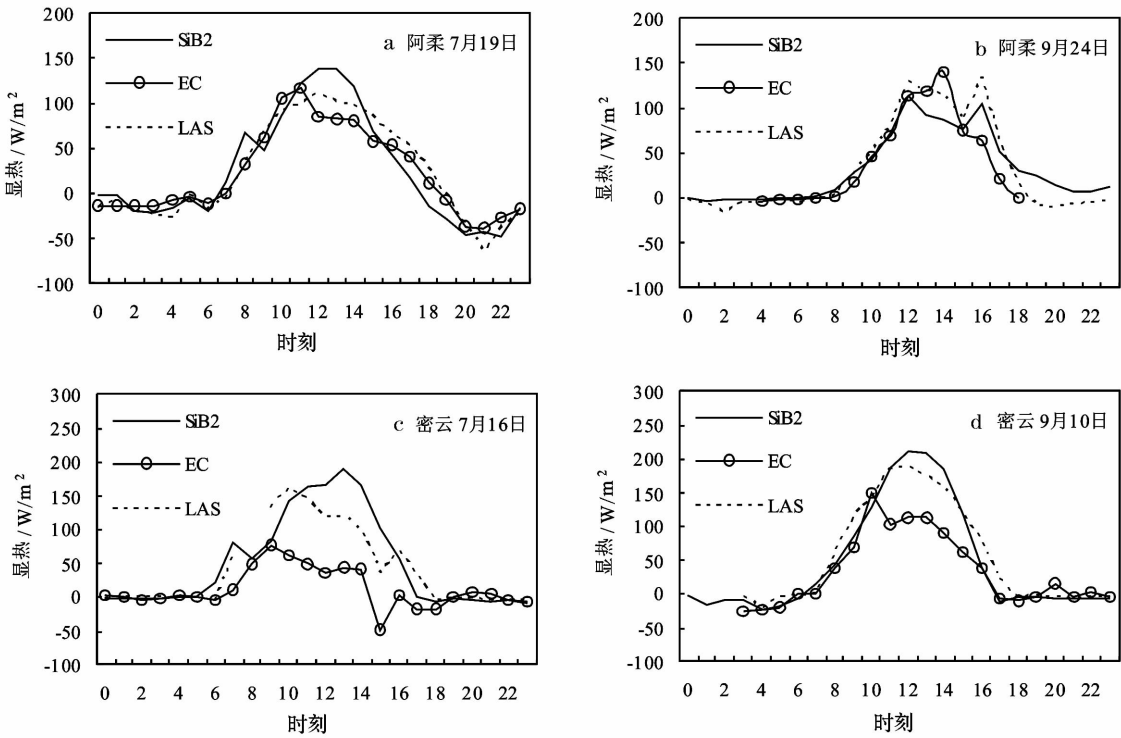


图 3 2008 年典型天显热通量日变化

Fig. 3 The diurnal variation of sensible heat flux in typical days in 2008

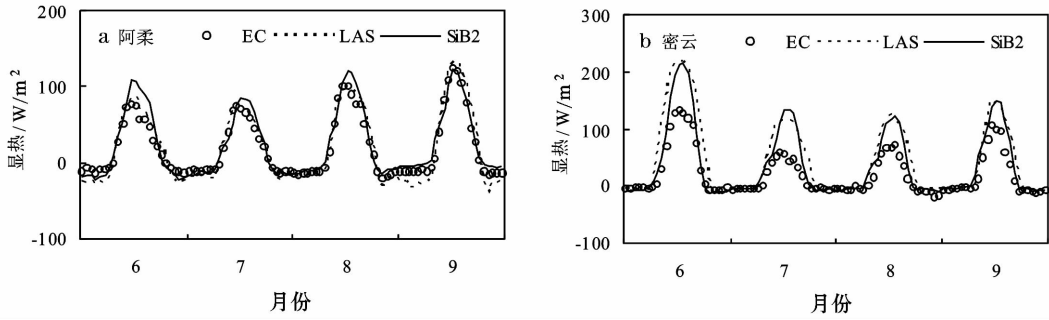


图 4 2008 年 6~9 月显热通量月均日变化

Fig. 4 The monthly averaged diurnal variation of sensible heat flux from June to September in 2008

不明显。7 月显热通量相对最小,日均峰值在 80 W/m^2 左右,6~7 月的下降很不明显,7~9 月的上升相对明显,9 月月均显热通量峰值上升到 140 W/m^2 左右;SiB2 模式基本能够模拟出显热通量的这种季节变化趋势,但是在 6~8 月存在比较明显的正午前后模拟偏高的情况,9 月模拟略有偏低,但并不明显。从 LAS 观测看,密云站显热通量同样遵循 6~9 月先下降后上升的变化趋势。6 月日均显热通量峰值在 200 W/m^2 以上,7 月则下降到 120 W/m^2 左右,7~8 月基本没有变化,9 月日均峰值上升到 150 W/m^2 左右;从模拟结果看,SiB2 能够较好地模拟出显热通量的季节变化,在 6 月的上午和下午存在一定的模拟偏低,但峰值基本与 LAS 观测一致,7 月正午前后的峰值则表现出模拟略为偏高,8 月、9 月模拟情况很好。

阿柔站 6~8 月出现的模拟偏高情况可能与阿柔草原相对寒冷的气候条件有关。利用 EC 的潜热通量与模拟进行了比较,发现 6~8 月模拟潜热通量是偏低的。如前所述,SiB2 模式是基于能量平衡进行能量交换参数化的,从计算流程看,模拟潜热偏低所多出来的能量会加到显热上去,而 6~8 月正好是植被生长最茂盛的时期,9 月植被枯萎很快,因此 6~8 月显热通量的偏高很可能是植被蒸腾模拟不够充分造成的;而比较 6~8 月阿柔土壤水分的模拟和实测,发现并不存在土壤水分模拟偏低的情况,这说明 SiB2 模式对阿柔草原这种高寒地区的植被蒸腾能力的模拟是不太充分的。尽管如此,这种偏差是不明显且可以接受的,并未影响到整体的模拟效果。

比较阿柔和密云可以看出,显热通量最小的情况基本上都出现在植被长势和水热条件最好的 7 月,这与 7 月地表蒸散发强烈是相关的。然而,阿柔站显热的季节变化没有密云站剧烈,尤其是 6~7 月的变化,这与 2 地的植被和气候条件差异是相关的:密云站 7 月、8 月降水丰富,而 6 月则相对干旱,从测得的土壤水分的情况来看,6 月 40 cm 处土壤体含水量平均值为 0.19,而 5 月和 7 月分别为 0.23 和 0.28,6 月的土壤水分偏低是造成潜热偏低、显热偏高的主要原因;另一方面,密云站耕地种玉米,6 月玉米刚刚出苗,生长还不旺盛,而 7 月则进入生长旺季,所带来的蒸散量的上升也是显热降低明显的一个重要原因。

3.2 LAS 在模式验证中的优势分析

图 2e、2f 显示,在密云站利用 LAS 显热进行公里尺度模拟结果的验证能够降低利用 EC 显热进行

验证 50% 左右的偏差,这是 LAS 观测对验证效果的提高。如前所述,这种提高一方面是由于 LAS 观测的空间范围与模式模拟更为接近,另一方面是因为 LAS 在能量闭合上优于 EC。

如果针对自动气象站和 EC 观测点附近百米范围进行模拟,且模拟结果比较准确,则模拟值与 LAS 观测值的差异可以看成是空间代表性差异引起的,而模拟值与 EC 观测值的差异则可看成 EC 能量不闭合性导致的。

本文以下垫面相对复杂的密云站为例,进行了自动气象站和 EC 百米范围内的模拟实验。如前所述,模式模拟的尺度更重要的是取决于植被参数的尺度,而大多数植被参数是不随尺度而改变的,能够体现尺度变化的主要就是 LAI 和植被覆盖度。因此,本文主要对 LAI 和植被覆盖度进行了重新设定,并进行了模拟。具体设定方法是:利用 2008 年 8 月 2 日的一景 TM 数据,计算密云观测塔附近 200 m 范围内(果园和耕地)的 LAI,计算方法参考了 SEBAL 模型^[29],计算的 LAI 为 4.5;同时,利用 TM 的 NDVI 换算得到植被覆盖度为 87%;采用 TM 计算值与 8 月 MODIS 的 LAI 和计算的植被覆盖度的比作为校正系数,对 6~9 月 MODIS 值进行了校正,即将 TM 计算得到的 LAI 和植被覆盖度在时间上扩展到各月。最后利用 TM 计算结果进行了模拟。

图 5 给出了模拟实验结果与观测的比较。可以看出,模拟净辐射(图 5a)存在 3% 左右的偏低,这个偏差小于公里尺度模拟 5.5% 的偏低(图 2b),这是本次模拟实验在尺度上更接近四分量观测仪的观测的表现。从图 5b、5c 可以看出,模拟的潜热、显热与 EC 观测相比分别高出 23%、21% 左右,这 2 个偏差的接近程度也说明了该次模拟实验在尺度上与 EC 观测是非常接近的,而且模拟结果是可靠的;模拟显热与 EC 观测的 R^2 为 0.68,相对于公里尺度模拟 0.46 的 R^2 (图 2f)有了显著提高。

在模拟结果基本可靠的前提下,可以利用其分析 LAS 观测对公里尺度验证效果 2 方面的提高。图 5c、5d 显示,模拟显热通量相对于 EC 观测偏高 21% 左右,相对于 LAS 观测偏低 28% 左右,这表明 LAS 在的公里尺度模拟验证中对验证效果的提高是在能量闭合及对下垫面的代表性上优于 EC 观测的综合表现,且在下垫面较复杂的条件下,这 2 方面的优势都比较显著。当然,公里尺度和百米尺度 2 个验证实验所反映出来的误差不能完全归结于 LAS 和 EC 2 种观测数据的差异,模式模拟结果的精度也

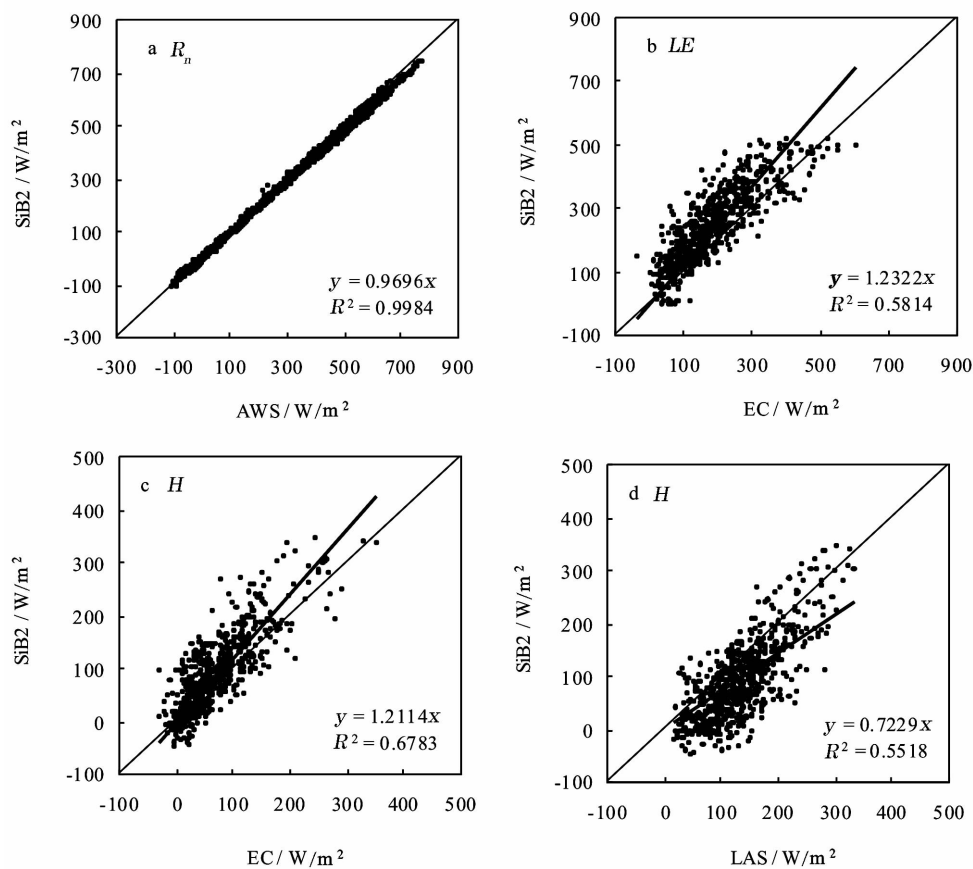


图 5 百米尺度模拟结果和观测的散点图(白天不稳定层结下数据)

Fig. 5 Comparison between the observation and the simulation results at 200-meter-resolution scale

会因为尺度的不同而存在差异。

为了探究模式模拟尺度差异所带来的结果差异,本文利用同一景 TM 数据,计算了 1 km²(前文选取的 MODIS 像元)范围内的 LAI 和植被覆盖度,根据 MODIS 的 LAI 和植被覆盖度值对 TM 计算值进行调整,使得 TM 计算值在 1 km²范围内的平均与 MODIS 值相等,再利用与前文相同的方法将 TM 计算结果扩展到各月。将 1 km²范围均分为 9 个网格,统计各网格中 TM 计算的 LAI 和植被覆盖度值,并利用该计算值对 9 个网格进行了模拟(其他参数与公里尺度一样),再将 9 个网格模拟的地表水热通量进行了区域平均,以便与公里尺度的模拟进行比较。

比较结果显示:TM 数据分 9 个网格进行模拟的净辐射比采用 MODIS 数据的模拟值偏低 1.1%,显热通量偏高 1.2%,而潜热通量偏低 5.4%(为了与前文的样本一致,此处仅使用白天不稳定层结且 LAS 和 EC 都有数据的情况下的值)。也就是说,模拟数据分辨率和模拟尺度的差异会导致模拟结果的

差异,但在复杂条件下这种差异相对于观测数据的差异(EC 和 LAS)是相对较小的。

4 结论与展望

综合利用自动气象站观测数据、地面调查数据以及卫星遥感数据,通过人为设定空间范围并以此为基准进行参数设置,在阿柔和密云 2 个观测站点实现了公里尺度(1 km²)的陆面过程模拟,并与 LAS 和 EC 观测的显热通量进行了比较。结果表明:LAS 观测更适合于较大尺度模拟的验证,在下垫面复杂的密云站利用 LAS 进行验证能够很大程度上避免 EC 验证引起的 50% 左右的偏差;SiB2 模式能够较好地模拟出阿柔和密云 2 种中国北方典型下垫面地表通量的大小、日变化和季节变化情况。

通过 LAI、植被覆盖度等关键参数的调整,实现了百米尺度的陆面过程模拟,且取得较为可靠的模拟结果。借助模拟结果对 LAS 在密云站公里尺度模拟验证中对验证效果的提高进行了定量分解,结果表明:在复杂下垫面情况下,LAS 相对于 EC 在能

量闭合和在对下垫面的代表性 2 方面上的优势都是比较显著的。

本文公里尺度的模拟所采用的输入数据的空间代表性不可避免存在一定的差异,不是严格意义上公里尺度的模拟,所进行的验证分析仅仅是为区域模拟验证提供参考和为 LAS 在模式验证中的应用提供示范,与实际的大尺度或较大尺度的区域模拟验证有一定差异。实际的区域模拟使用的数据多为再分析数据,存在更多的不确定性,因此,有必要利用 LAS 数据进一步对陆面模式的区域模拟结果进行验证研究。

LAS 数据相对于 EC 有很显著的优势,但需要指出它也有明显的劣势。首先它对涡动不是直接观测,需要通过空气的折射指数结构参数进行推算,理论更为复杂,加之其发展较晚,仪器的工程技术不如 EC 成熟^[15],因此其观测得到的显热通量的可靠性还有待提高。其次 LAS 观测并不能直接获取区域内的潜热通量,需要通过净辐射、土壤热通量的观测从能量平衡角度进行估算,这当中也存在误差传递问题和尺度问题。因此如何更好地开发和利用 LAS 数据进行模式的验证还有待进一步研究,构建尺度转化方案综合利用 EC 和 LAS 进行验证是可研究的方向之一。

LAS 数据不仅可以用在模式验证,而更有潜力和价值的一项应用是模式的校正,通过对模式的校正,提高模式对陆面过程的模拟效果,对整个气候预报和变化研究都有着重要意义。

致谢: 本文相关研究工作得到阳坤研究员的帮助,特此感谢。

参考文献 (References):

- [1] Sun Shufen. The Physical, Biochemical Mechanisms and Parameterization Model of Land Surface Processes[M]. Beijing: Meteorological Press, 2005. [孙蓀芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [2] Manabe S. Climate and ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the Earth's surface[J]. *Monthly Weather Review*, 1969, 97(11): 805-939.
- [3] Manabe S, Smagorinsky J, Strickler R F. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle[J]. *Monthly Weather Review*, 1965, 93(12): 769-798.
- [4] Dickenson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model[R]. NCAR Tech. Note, TN-275 + STR, 1986.
- [5] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43(6): 505-531.
- [6] Deardorff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(C4): 1 889-1 903.
- [7] Bonan G B. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D2): 2 817-2 831.
- [8] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 676-705.
- [9] Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. The common land model[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1 013-1 023.
- [10] 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.]
- [11] Yang K, Chen Y Y, Qin J. Some practical notes on the land surface modeling in the Tibetan plateau[J]. *Hydrology and Earth System Science*, 2009, 13(5): 687-701.
- [12] Colello G D, Sellers P J, Berry J A. Modeling of energy, water and CO₂ flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2: May-October 1987[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, 55(7): 1 141-1 169.
- [13] Prihodko L, Denning A S, Hanan N P, et al. Sensitivity, uncertainty and time dependence of parameters in a complex land surface model[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(2): 268-287.
- [14] Wang Jiemin, Wang Weizhen, Liu Shaomin, et al. The problems of surface energy balance closure—An overview and case study [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 705-713. [王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.]
- [15] 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. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 171-178.]
- [16] Kleissl J, Hong S, Hendrickx J M H. New Mexico scintillometer network: Supporting remote sensing and hydrologic and meteorological models[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(2): 207-218.
- [17] Wang Weizhen, Xu Ziwei, Liu Shaomin, et al. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe river basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 714-723. [王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-

723.]
- [18] Sellers P J, Los S O, Tucker C J, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. PartII: The generation of global field of terrestrial biophysical parameters from [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 706-737.
- [19] Randall D A, Dazlich D A, Zhang C, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. PartIII: The greening of the Colorado state university general circulation model[J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4): 738-763.
- [20] Sen O L, Shuttleworth W J, Yang Z L. Comparative evaluation of BATS2, BATS, and SiB2 with amazon data [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2000, 1(2): 135-153.
- [21] Hanan N P, Berry J A, Verma S B, *et al.* Testing a model of CO₂, water and energy exchange in Great plains tallgrass prairie and wheat ecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4): 162-179.
- [22] Gao Zhiqiu, Bian Lingen, Cheng Yanjie, *et al.* Modeling of energy budget using Simple Biosphere model version2(SiB2) over Tibetan Naqu prairie[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2002, 13(2): 129-141. [高志球, 卞林根, 程彦杰, 等. 利用生物圈模型 SiB2 模拟青藏高原那曲草原近地面层能量收支[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(2): 129-141.]
- [23] Watanabe T, Kondo J. The influence of canopy structure and density upon the mixing length within and above vegetation[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1990, 68(2): 227-235.
- [24] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.* Atmospheric Physics[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003. [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.]
- [25] 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. 一种基于土壤温湿度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.]
- [26] Bai Jie, Liu Shaomin, Ding Xiaoping, *et al.* Study on 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.]
- [27] 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.]
- [28] 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): 16-27.]
- [29] Waters R, Allen R, Tasumi M, *et al.* SEBAL-Advanced training and users manual [R]. The Idaho Department of Water Resources, 2002.

A Preliminary Study of the Validation of Land Surface Models with Large Aperture Scintillometer Data

LI Yuan, SUN Rui, LIU Shaomin, XU Ziwei, BAI Jie
(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The application of large aperture scintillometer observations to the validation of land surface models has important significances in better understanding and describing the influences of land surface processes on climate change. With observational data from stations, field survey data, and remote sensing data, the land surface processes of Miyun and Arou, two typical flux observation stations in northern China, were simulated by SiB2 model at the spatial scale of 1km². The simulation was validated by the sensible heat fluxes obtained by Large Aperture Scintillometer (LAS) and Eddy Covariance measurement (EC). The results showed that: ①SiB2 has given a good simulation of the sensible heat flux as well as its diurnal variation and seasonal variation; ②The validation of large scale simulation by LAS can avoid the disadvantage of EC, such as energy disclosure and spatial scale differences with model simulation, and could give better results.

Key words: SiB2; Large aperture scintillometer; Eddy covariance; Model validation.