

SiB2 模型在黄灌区的应用探讨

褚英敏<sup>1</sup>，袁再健<sup>2</sup>，刘 畅<sup>1</sup>，史建平<sup>1</sup>，张京京<sup>2</sup>

(1. 河北经贸大学 旅游学院, 石家庄 050061; 2. 河北科技大学 经济管理学院, 石家庄 050018)

**摘 要:** SiB2 (simple biosphere model Version 2) 是用来模拟生态系统通量较为理想的国外模型, 为了探讨其在我国黄河灌区的适用性及利用遥感数据驱动模型的可行性, 并用其来研究该地区农田能量收支情况, 以位山灌区为研究试点, 利用位山实验站 1 a 左右的观测数据对模型进行了验证分析, 模拟结果表明: SiB2 模型能够较好地模拟位山试验站农田的能量通量、CO<sub>2</sub> 通量及地表温度, 净辐射、潜热通量、感热通量、CO<sub>2</sub> 通量与地表温度的模拟值与观测值吻合较好, 线性相关系数 *R* 分别为 0.988, 0.714, 0.607, 0.677 与 0.933, 其中净辐射模拟效果最好, 感热通量偏差较大。另外, 利用遥感 MODIS LAI 数据驱动 SiB2 模型表明, 除净辐射外, 模拟效果很差, 因此在站点尺度遥感 LAI (叶面积指数, leaf area index) 产品不适合驱动 SiB2 模型。

**关键词:** SiB2; 黄河灌区; 能量通量; CO<sub>2</sub> 通量; 模拟; 遥感数据

中图分类号: S154.4; P422      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2011)02-0159-05

An Application of SiB2 in the Yellow River Irrigation Region

CHU Ying-min<sup>1</sup>, YUAN Zai-jian<sup>2</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>, SHI Jian-ping<sup>1</sup>, ZHANG Jing-jing<sup>2</sup>

(1. College of Tourism, Hebei University of Economics & Business, Shijiazhuang 050061, China;  
2. School of Economics & Management, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** SiB2 (simple biosphere model Version 2) can be used to simulate the dynamic change of the flux of water, heat and carbon. In order to discuss its applicability in plain for our country, this paper simply introduced the structure and control equations of SiB2 at first, and then used it to simulate the surface energy budget in Weishan irrigation area based on the data of Weishan observation station. The results showed that the simulated net radiation, latent heat flux, sensible heat flux and CO<sub>2</sub> flux were shown to be basically in agreement with observations with their linear correlation coefficient being 0.988, 0.714, 0.607, 0.677 and 0.933 respectively. In addition, the simulated value of sensible heat flux and CO<sub>2</sub> flux were higher than the observed value and the simulated net radiation and latent heat flux were lower than the observed ones. In addition, MODIS LAI products were used to drive the model and found that the simulation results were not satisfactory except net radiation. Therefore, at the observing site scale, the remote sensing MODIS LAI products are not suitable for driving SiB2 model.

**Key words:** SiB2 (simple biosphere model Version 2); The Yellow River irrigation region; energy flux; CO<sub>2</sub> flux; simulation; remote sensing data

陆面过程模型研究大致经历了 3 个阶段: 最初是 Manable 等的简单“水桶(Bucket)”模型, 模型中整个陆面地表参数(地表反照率、空气动力学粗糙度、土壤湿度)取为定值, 地面蒸发量与桶内水量成正比<sup>[1]</sup>。20 世纪 80 年代以来较为复杂的陆面模型, 对地表覆盖物进行分类, 按下垫面类型并结合观测资料对其使用的相应参数进行了描述。模型都考虑了植被在地

一气物质能量循环中的作用(尤其是植物的生理过程), 但对植被生化过程的描述还不够成熟。90 年代以后, 新一代陆面模式考虑了植物内部水循环和碳循环等过程, 引入了遥感学、植被学和土壤学等相关学科的研究成果, 如 Dickinson 等的生物圈一大气传输方案(BATS)和 Sellers 等的简单生物圈模型(SiB/SiB2)<sup>[2-5]</sup>。

收稿日期: 2010-10-18      修回日期: 2010-11-15  
资助项目: 国家自然科学基金资助项目(40901130); 河北省教育厅科学研究计划项目(S090217)  
作者简介: 褚英敏(1977—), 女, 河北定州人, 讲师, 主要从事 GIS、生态水文与旅游资源管理等研究。E-mail: chuyingmin1977@163.com  
通信作者: 袁再健(1976—), 男, 湖南武冈人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持、生态水文以及 GIS 应用研究。E-mail: selfsurpass@163.com

自从 1996 年 Sellers 等推出 SiB2 以来,该模型越来越多地被用来模拟不同地区能量交换和 CO<sub>2</sub> 通量<sup>[6-13]</sup>,结果表明:SiB2 除了高估感热通量 20%~50%,模拟净辐射、潜热、下垫面热通量以及土壤温湿度都与观测结果接近,相对误差在 10%之内<sup>[13]</sup>。因而可以用 SiB2 研究农业生态区的能量交换、CO<sub>2</sub> 通量以及土壤温湿度分布,然而到目前为止,尚无关于 SiB2 模拟我国平原地区农田能量收支的研究报道。本文以位山灌区为研究试点,利用遥感数据与部分常规气象数据驱动 SiB2 模型,模拟了灌区典型农田的能量通量、CO<sub>2</sub> 通量与地表温度,主要目的在于探讨 SiB2 在我国黄河灌区的适用性以及利用遥感数据驱动模型的可行性,为该地区的热、碳通量的综合研究提供技术支持。

1 试验概况

试验区位山灌区位于山东聊城市境内,华北平原东南侧,灌区地势平坦,平均海拔为 30 m,属暖温带季风气候,年均降雨量为 580~670 mm,夏季(6—9 月)降水占全年降水量的近 70%,土壤类型为粉壤土,80%以上土地利用为农田,农业生产以冬小麦和夏玉米为主,其中冬小麦平均生长期为 10 月上旬至次年 6 月中旬,夏玉米生长期为 6 月中旬至 10 月上旬。水热通量观测站布设在面积约 400 m×500 m 的农田中心(北纬 36°39',东经 116°03'),田间土质均匀,种植结构单一,在灌区具有代表性,并满足试验要求的盛行风向的风浪区长度。

通量观测的主要设备包括:1 座 10 m 高的观测塔,塔上安装有常规气象观测系统、辐射观测系统及涡度相关观测系统等;2 个土壤观测剖面以及 1 口地下水观测井。涡度相关系统安装在 1 个可调节高度的悬臂上并伸到田间作物冠层的上方,在观测过程中针对不同作物调节其高度。该系统的主要仪器包括:3-D 超声风速温度计(CSAT3, Campbell Scientific, Inc.),用于测量 3 个互相垂直方向上的瞬时风速及空气温度;CO<sub>2</sub> 和水分红外分析仪(LI7500, LI7500, Inc.),用于测量空气中的瞬时水汽、CO<sub>2</sub> 浓度。数据采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出 1 组平均值。常规气象观测项目包括气压、3 个高度的空气温湿度(高分别为 1.50,3.55,6.00 m),风速和降雨。辐射观测系统的观测项目有短波辐射(向上,向下)、长波辐射(向上,向下)、光合有效辐射及土壤热通量。两个土壤剖面分别在 5,10,20,40,80,160 cm 深度处观测土壤温度和含水量。约每隔 2 周测定 1 次作物叶面积指数(leaf area index, LAI)。田间能量平衡通

过观测数据直接计算得到,其中,净辐射为短波与长波辐射的代数和,潜热和显热通量采用涡度相关法计算,当数据缺乏时采用波文比能量平衡法计算<sup>[14]</sup>。

2 SiB2 介绍

1986 年 Sellers 建立了一个一维土壤—植被—大气模型:SiB(Simple Biosphere model)<sup>[9]</sup>。通过具有代表性的植被类型的模拟过程类推到区域内的植被覆盖过程,SiB 把辐射通量,热通量和动量通量的相互作用过程连接起来,通过一些参数化过程,模拟下垫面本身的植被性质和这种植被决定陆面和大气的作用方式。在 SiB 改进和科学进步的基础上,1996 年 Sellers 创立了 SiB2,成为一个更简单更精确的模型。

SiB2 将 3 种界面——土壤、植被和大气的相互作用结合起来,成为一个各部分相互作用的过程。如图 1 所示,为了加入一个光合—传导的迭代模型并使用卫星资料描述表面参数,SiB2 将 SiB 中的两层植被参数简化成一层植被。 $Z_m$  为参考高度,就是温度风速等的观测高度, $Z_2$  和  $Z_1$  分别是冠层顶高和底高, $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$  分别是地表层土壤、根区层土壤和深层土壤的厚度。

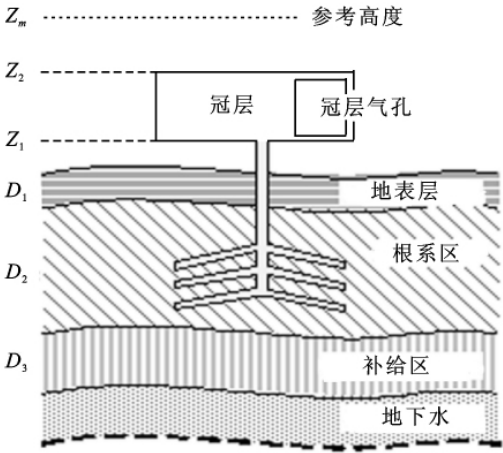


图 1 SiB2 结构示意图<sup>[5]</sup>

SiB2 有 11 个预报量,分别为 3 个温度(冠层温度  $T_c$ ,土壤表层温度  $T_g$ ,深层土壤温度  $T_d$ );两个截留水储存(冠层水储存  $M_{cw}$ ,土壤表面水储存  $M_{gw}$ );两个截留雪盖(或冰)储存(冠层和地表分别表示为:  $M_{cs}$ ,  $M_{gs}$ );3 个土壤湿度值(根据 SiB2 模型土壤 3 个深度的湿度:  $W_1, W_2, W_3$ );一个冠层阻抗预报值( $g_c = l/r_c$ ),这 11 个变量的控制方程详见 Sellers 的文章<sup>[3]</sup>。另外, SiB2 需要 6 个强迫变量:向下短波辐射、向下长波辐射、水汽压、空气温度、测量高度上水平风速和降水量,每个时段的这 6 个强迫变量来自实际观测。SiB2 所用的控制方程主要有<sup>[3-5,13]</sup>:

$$H=H_c+H_g \tag{1}$$
式中:  $H$ ——感热通量;  $H_c$ ——冠层部分感热通量, $H_c=\frac{(T_c-T_a)\rho c_p}{r_b}$ ;  $T$ ——冠层温度(K);  $T_a$ ——冠层间空气温度(K);  $\rho$ ——空气密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c_p$ ——定压比热[ $1005 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ];  $r_b$ ——冠层与冠层空气间的空气动力学阻抗( $\text{S}/\text{m}$ );  $H_g$ ——裸土地面感热通量, $H_g=\frac{(T_g-T_a)\rho c_p}{r_b}$ ;  $T_g$ ——土壤表层温度(K)。

$$\lambda E=\lambda E_{ct}+\lambda E_{gs} \tag{2}$$
式中:  $\lambda E$ ——潜热通量;  $\lambda E_{ct}$ ——冠层潜热通量,  $\lambda E_{ct}=\frac{(100e^*(T_c)-100e_a)\rho c_p/\gamma}{r_c+2r_b}$ ;  $e^*(T_c)$ ——温度  $T_c$  下的饱和水汽压(Pa),  $e_a$ ——冠层间水汽压(Pa),  $\gamma$ ——干湿表常数;  $r_c$ ——冠层表面的气孔阻抗( $\text{S}/\text{m}$ );  $\lambda E_{gs}$ ——裸土地表潜热通量,  $\lambda E_{ct}=\frac{(100h_{soil}e^*(T_g)-e_a)\rho c_p/\gamma}{r_{soil}+r_d}$ ;  $h_{soil}$ ——裸土表面孔体内相对湿度;  $e^*(T_g)$ ——温度  $T_g$  下的饱和水汽压(Pa);  $r_{soil}$ ——裸土表面阻尼( $\text{S}/\text{m}$ )。

净辐射计算公式表示为:

$$R_n=R_{nc}+R_{ngs} \tag{3}$$
式中:  $R_n$ ——净辐射;  $R_{nc}$ ——冠层净辐射,  $R_{nc}=\langle F_c \rangle - 2\sigma_c T_c^4 V_c \delta_1 + \sigma_s T_{gs}^4 \delta_1$ ,  $\langle F_c \rangle$ ——冠层吸收的可见光 4 个辐射分量之和,  $\sigma_s$ ——波尔兹曼常数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ];  $V_c$ ——下垫面植被的覆盖比;  $\delta_1$ ——冠层对热辐射的吸收率;  $R_{ngs}$ ——裸土地表净辐射,  $R_{ngs}=\langle F_{gs} \rangle - \sigma_s T_{gs}^4 + \sigma_s T_c^4 V_c \delta_1$ ,  $\langle F_{gs} \rangle$ ——地面吸收的可见光 4 个辐射分量之和。

SiB2 中的碳通量用下式计算:

$$C=A_c-R_D-R_{soil} \tag{4}$$
式中:  $C$ —— $\text{CO}_2$  通量;  $A_c$ ——光合作用吸收的  $\text{CO}_2$ , 方向向下;  $R_D$ ——植被呼吸放出的  $\text{CO}_2$ , 方向向上;  $A_c-R_D$ ——植被部分的净  $\text{CO}_2$  通量,  $A_c-R_D=\frac{c_a-c_i}{p(1.6r_c+2.8r_b)}$ , 方向向下;  $c_a$ ——冠层空隙内  $\text{CO}_2$  压强(Pa);  $c_i$ ——整个冠层叶子内部  $\text{CO}_2$  压强的总和(Pa);  $p$ ——大气压强(Pa);  $R_{soil}$ ——裸土地表  $\text{CO}_2$  通量,  $R_{soil}=\frac{c_{soil}-c_a}{p(1.4r_d)}$ , 方向向上;  $c_{soil}$ ——裸土表面  $\text{CO}_2$  压强(Pa)。

3 SiB2 在黄灌区的应用

模型利用 MODIS 的 LAI 产品与常规气象资料, 模拟时段范围为 2005 年 6 月 1 日 0 时至 2006 年 5 月 31 日 23 时(由于仪器发生故障, 缺 2006 年 3 月 7 日至 3 月 11 日的观测数据), 以 1 h 为时间步长, 主要模拟各时段的能量各分量(包括净辐射、感热通量与潜热通量等)与  $\text{CO}_2$  通量。

3.1 SiB2 参数化

SiB2 中的参数设置参照高志球<sup>[9,13]</sup>的研究过程并结合位山试验站实际观测资料设置。在模型运行之前, 需要对 SiB2 的一些参数初始化, 它们是植被温度(290.0 K), 地表温度(292.0 K), 深土温度(288.0 K), 冠层空气温度(289.0 K), 参照高度(1.5 m)上气温(291.0 K), 土壤表面层湿度(0.5), 根域湿度(0.6), 交换域湿度(0.6), 以上括号内值为 2005 年 6 月 1 日 0 时刻的观测值, 这些参数会随着下垫面条件(包括作物生长, 气象条件变化)的变化而变化。

3.2 净辐射模拟

地面获得的净辐射是驱动下垫面与大气相互作用的主要能量源, 其中一部分传导到土壤深层, 其余部分以湍流方式与大气进行热量和水汽交换。净辐射的变化受天气过程的影响较大, 一日中正午值最大。SiB2 表明能量平衡方程为:

$$R_n=\lambda E+H+G+S+M \tag{5}$$
式中:  $R_n$ ——净辐射;  $\lambda E, H$ ——潜热和感热通量;  $G$ ——土壤热存储;  $S$ ——冠层热存储;  $M$ ——光合作用呼吸耗能, Harazono 等<sup>[15]</sup>指出  $M$  不足  $R_n$  的 1%, 因而可以忽略。

本研究中, SiB2 对净辐射的模拟效果不错, 相关系数  $R$  达 0.988, 模拟值与实测值较接近(见图 2a), 其时平均值分别为  $62.40 \text{ W}/\text{m}^2$  与  $71.57 \text{ W}/\text{m}^2$ 。从图上也可看出, 净辐射一日中最大值出现在正午, 夜间基本上为负值(见图 2b, 为了图表清晰显示, 这里随意挑选了 20 d 的数据进行对比, 即 4 月 10—30 日, 下同)。

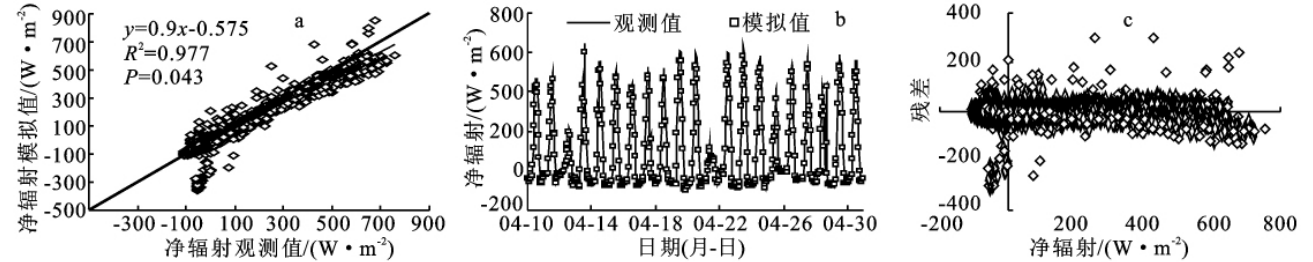


图 2 模拟与观测的净辐射对比

3.3 潜热通量与感热通量模拟

潜热通量是地表热量平衡中的一个重要组成部分,它的大小表征地—气之间水汽交换的强度。潜热交换与下垫面的潮湿程度及天气状况有关,特别是在农田非常潮湿且天气晴朗的情况下,蒸发量大是显而易见的。农田在每次降水过程或灌溉后,潜热通量都有明显的增加,以上观测数据系列中最大峰值达到  $540.23 \text{ W/m}^2$ ,而在晴天期间均稳定维持着较大的潜热交换。在以上时间系列中,农田的平均潜热通量模拟值与观测值分别为  $42.56 \text{ W/m}^2$  与  $45.62 \text{ W/m}^2$ ,模拟值小于观测值,潜热通量的模拟效果较好,相关系数  $R$  为  $0.714$ (见图 3)。

感热通量也是地面热平衡方程中的主要分量。感热通量的计算主要取决于地表与上层空气的风速差和温度差。感热通量的日际变化和日变化与净辐

射相同,有很好的规律性,明显体现出天气过程的影响,大部分时间的日变化规律均为白天加热大气,夜间从大气获得热量。以上时间系列农田的平均感热通量模拟值与观测值分别为  $20.03 \text{ W/m}^2$  与  $13.90 \text{ W/m}^2$ ,模拟值大于观测值,模拟精度不太理想,相关系数  $R$  为  $0.607$ (见图 4)。

3.4  $\text{CO}_2$  通量模拟

从图 5 可以看出, $\text{CO}_2$  通量表现出明显的日变化:白天由于光合作用,植物吸收  $\text{CO}_2$  强烈;夜间植物呼吸作用向大气放出  $\text{CO}_2$ 。图中正值表示吸收  $\text{CO}_2$ ,负值表示向大气排放  $\text{CO}_2$ 。从图 5 中也可看到 SiB2 对植物光合作用引起的  $\text{CO}_2$  通量过程模拟效果一般,整个时段模拟  $\text{CO}_2$  时均值为  $0.66 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,实测值平均为  $0.39 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,线性相关系数  $R$  为  $0.677$ 。

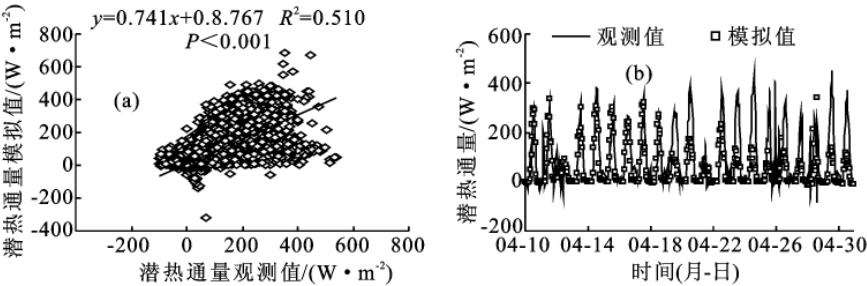


图 3 模拟与观测的潜热通量对比

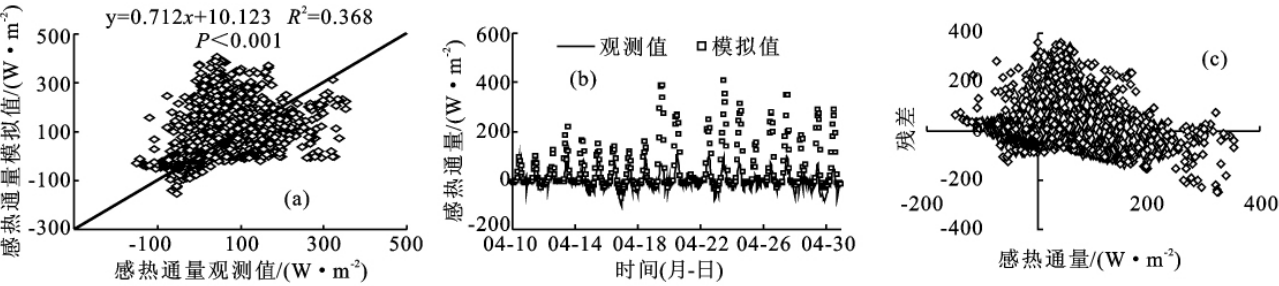


图 4 模拟与观测的感热通量对比

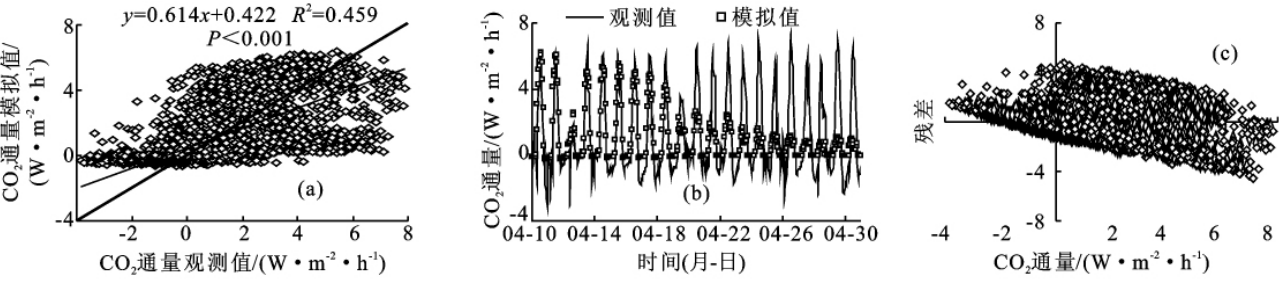


图 5 模拟与观测的  $\text{CO}_2$  对比

3.5 地表温度模拟

从图 6 可以看出, SiB2 对地表温度的模拟效果不错,线性相关系数  $R$  达  $0.933$ ,模拟平均值观测平均值分别为  $15.11^\circ\text{C}$  与  $14.10^\circ\text{C}$ 。

另外,为了探讨利用遥感数据在站点尺度驱动 SiB2 模型的可行性,利用位山站点 MODIS 的 LAI 数

据(MODIS 的 LAI 与观测 LAI 对比见图 7)驱动 SiB2 模型,发现除净辐射外,其余项目模拟效果很差。

4 结论

把 SiB2 运用到位山灌区,利用 1 a 左右的观测数据对模型进行了检验,结果表明:

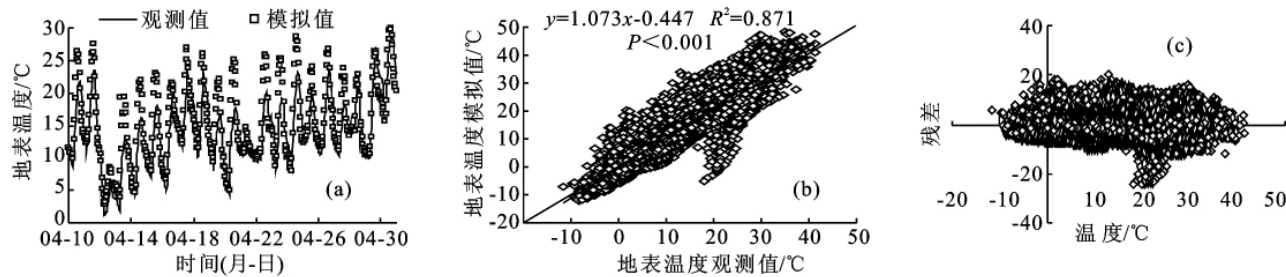


图 6 模拟与观测的地表温度对比

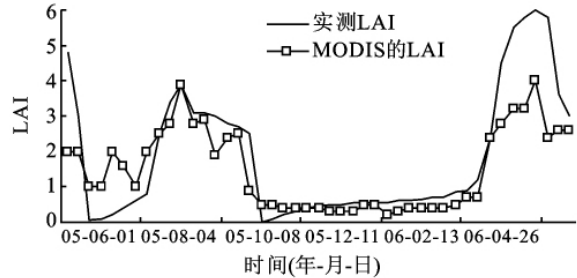


图 7 实测 LAI 与 MODIS 的 LAI 对比

(1)SiB2 能够较好的模拟研究区典型农田能量过程及 CO<sub>2</sub> 通量与地表温度变化过程,净辐射、潜热通量、感热通量、CO<sub>2</sub> 通量以及地表温度的模拟值与观测值的一致性较好,线性相关系数 R 分别达 0.988, 0.714,0.607,0.677 与 0.933,并且模拟的感热通量与 CO<sub>2</sub> 通量较实测值偏高,而模拟的净辐射与潜热通量偏低,其中感热通量模拟偏差较大。

(2)在农田站点尺度,MODIS LAI 产品较实测 LAI 偏小,利用其驱动 SiB2 模型模拟站点尺度农田热、碳通量效果不太理想。

(3)另外,在研究过程中发现 SiB2 对叶面积指数这一输入参数很敏感。另外,SiB2 模型的初始化参数对模拟结果影响很大,具体来说,初始化参数变化 2%,净辐射模拟平均值变化 3.7%,潜热通量变化 2.8%,感热通量变化 14.33%,CO<sub>2</sub> 通量变化 27.26%,地表温度变化 1.1%,当然,以上研究基于的数据序列不到 1 a,能否用 SiB2 进行长系列(10 a 以上)通量模拟以及能否把模型运用到整个黄河灌区与我国其它平原地区等问题还有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Manabl S. Climate and Ocean Circulation[J]. Month Weather Review,1969,97:739-774.

[2] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model[C] // NCAR Technical Note NCAR/TN-387 + STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO. 1993.

[3] Seller P J, Mintz Y, ud Y C, et al. A simple Biosphere Model (SIB) for Use within General Circulation Models

[J]. Journal of the Atmosphere Science,1986,43(6): 505-531.

[4] Seller 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,1996,9:685-703.

[5] Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. A revised Land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs; Part II . The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data[J]. Journal of Climate,1996,9:706-737.

[6] Zhang C, Dazlich D A, Randall D A, et al. Calculation of the global land surface energy, water and CO<sub>2</sub> fluxes with an off-line version of SiB2[J]. J. Geophys. Res. , 1996,101(14):19061-19075.

[7] Colello G D, Griver C, Sellers P J, et al. Modeling of energy, water, and CO<sub>2</sub> flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2; May-October 1987[J]. Journal of the Atmospheric Sciences,1998,55:1141-1169.

[8] Chae Namyi, Gao Zhiqiu, Kim Joon. Testing the energy budget closure in a Tibetan prairie using the version 2 of the Simple Biosphere Model (SiB2)[J]. Eos, Transactions, American Geophysical Union,2000,81(22): 5.

[9] 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.

[10] 李新,小池俊雄,程国栋. 一个基于模拟退火法的陆面数据同化算法[J]. 地球科学进展,2003,18(4):632-636.

[11] 姚凤梅,张佳华. 全球及区域模式中陆面过程的地表植被覆盖分类方法[J]. 干旱区地理,2006,29(6):872-877.

[12] 黄春林,李新. 土壤水分同化系统的敏感性试验研究[J]. 水科学进展,2006,17(4):457-465.

[13] 高志球,卞林根,陆龙骅,等. 水稻不同生长期稻田能量收支、CO<sub>2</sub> 通量模拟研究[J]. 应用气象学报,2004,15(2): 129-140.

[14] 雷慧阁,杨大文,沈彦俊,等. 黄河灌区水热通量的观测与分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(6): 801-804.

[15] Harazono Y, Kim J, Miyata A, et al. Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan[J]. Hydrological Processes,1998,12:2018-2092.