

半干旱区农田和草地与大气间二氧化碳 和水热通量的模拟研究

姜纪峰^{1,2} 延晓冬² 黄耀^{1,3} 郭维栋² 刘辉志³ 王淑瑜²

1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 集成生物圈模型 (IBIS) 是目前最复杂的基于动态植被模型的陆面生物物理模型之一。通过应用该模型对国际协调强化观测计划 (CEOP) 半干旱区基准站之一的吉林通榆观测站 (44°25'N, 122°52'E) 草地和农田生态系统 2003 年全年的 CO₂ 和水、热通量变化进行模拟, 并将结果与涡度相关法测定的观测值进行了对比分析, 以检验 IBIS 模型在半干旱区的模拟能力。对比结果表明: 除 CO₂ 通量模拟结果不够理想外, IBIS 模型较好地模拟了通榆观测站的感热通量和潜热通量。模拟与观测比较的相关系数均通过了 0.05 以上显著性水平的信度检验。总体上看, 模型对农田生态系统模拟的偏差小于对退化草地的模拟。

关键词 IBIS 模型 CO₂ 通量 感热通量 潜热通量

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0413-12 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

Simulation of CO₂ and Sensible/Latent Heat Fluxes Exchange between Land Surface and Atmosphere over Cropland and Grassland in Semi-Arid Region

JIANG Ji-Feng^{1,2}, YAN Xiao-Dong², HUANG Yao^{1,3},
GUO Wei-Dong², LIU Hui-Zhi³, and WANG Shu-Yu²

1 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095*

2 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*

3 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract The Integrated Biosphere Simulator (IBIS) is one of the most sophisticated models in simulating terrestrial biosphere processes based on dynamic vegetation schemes. For the purpose of validating IBIS in semi-arid region and eventually improving the model's capability for specific land cover types in China, a simulation for the whole 2003 year was conducted over cropland and degraded grassland in Tongyu field observation station (44°25'N, 122°52'E) in Jilin Province of China, which is one of the reference sites of international Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP). Model inputs include the site ecosystem characteristics and main meteorological variables. Comparisons between simulated land surface fluxes and observed eddy covariance (EC) measurements show that the

收稿日期 2006-03-20 收到, 2006-04-16 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218 和国家重点基础研究发展规划 2002CB412503

作者简介 姜纪峰, 男, 1981 年出生, 硕士, 从事碳、水循环耦合模型的应用研究。E-mail: jiangjf@tea.ac.cn

model is capable of reproducing CO_2 , sensible and latent heat fluxes indicated by correlation coefficients exceeding the significant level of 0.05. In general, CO_2 flux and sensible heat flux have obvious diurnal and seasonal variation both at the grassland and the cropland, while the latent heat flux, which is related to evapotranspiration, only has diurnal variation during the growing season. Meanwhile, all fluxes at the cropland are larger than those at the degraded grassland, especially in the growing season, and one of possible reasons for these is that crops grow much better than degraded grass. The model generally estimates lower annual CO_2 (underestimating 9.29% in the grassland and 3.73% in the cropland) and latent heat flux (with corresponding percents 4.63% and 3.48%), and greater annual sensible heat flux (overestimating 9.90% and 11.98%, respectively) than measured by EC. And the simulations for the cropland are better than those for the grassland, with more reasonable model-measurement agreements.

Key words IBIS, CO_2 flux, sensible heat flux, latent heat flux

1 引言

陆地生物圈是全球碳循环和水循环中不可缺少的一部分, 每年大气中约 14% 的碳与陆地生物圈发生交换, 约 20% 的水从陆地蒸散作用中得到^[1]。同时, 大气、植被及土壤间的水分、 CO_2 等物质循环和能量流的物理过程与生物地球化学过程之间存在着一定的相互作用和密切联系^[2]。陆地生态系统的碳循环和水循环研究已经成为全球变化领域中的核心问题之一。为准确预测未来全球变化趋势, 寻求地球生态系统碳循环和水循环调控管理的有效途径, 必须了解陆地生态系统碳水循环的各种过程和反馈机制。生态系统能量与物质(水和碳)通量循环动力学模型是分析陆地生态系统碳、水循环过程机制和预测循环通量的一种有效手段^[3]。这类模型一般可以按照模型重点考虑的过程和主要用途分为生物地理模型、生物地球化学模型、陆面生物物理学模型和遥感模型等^[2,3]。代表性的模型有 BATS^[4]、FOREST-BGC^[5]、BIOME-BGC^[6]、AVIM^[7]、IBIS^[8,9]、SIB2^[10]和 TEM^[11,12]等。

目前, 各类模型在土壤-植被-大气间碳、水通量交换的研究中已经得到广泛应用, 但依据实测资料在不同时间、空间尺度上的模型验证却非常缺乏。因此, 在应用上述各种模型进行生态系统碳、水循环过程的模拟时, 鉴于数据资料的限制, 模型的验证工作仍然十分值得关注。而在诸多数据测定方法中, 通过测量物理量的脉动来计算通量的涡度相关法, 以其测量精度较高、理论假设条件较少的优势, 使其成为确定大气和生态系统边界层间水、气(CO_2 等)交换的一种微

气象学观测手段, 目前已成为世界上生态系统水热和 CO_2 通量测定的标准方法, 所测定的数据被用于检验各种模型模拟或估算的精度^[13]。

通榆观测实验站是在国家基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”的支持下, 由中国科学院大气物理研究所建立的“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站, 同时也是国际协调强化观测计划(CEOP)亚洲季风比较研究(CAMP)的一个地面观测基准站^[14]。除了长期监测感热、潜热等湍流通量以外, 同时还监测 CO_2 的湍流通量, 可为碳通量研究提供部分资料。通榆的长期连续观测资料, 可用于验证半干旱地区陆气相互作用不同参数化方案的效果, 对于改进半干旱地区陆气相互作用参数化方案有重要作用。

过去关于 IBIS 模型的诸多研究主要集中在北美、欧洲和非洲部分地区^[15~20], 在亚洲区域, 尤其我国境内的研究报道较少。因而, 有必要对该模型在我国进行有效性验证, 以期在此基础上, 对模型参数作进一步的修正, 从而最终建立适合模拟我国典型生态系统状况的 IBIS 模型。本文的目的就在于, 利用通榆观测站的通量数据, 对 IBIS 模型模拟水热通量与碳通量的能力进行验证, 从而为更大范围尺度的模型模拟有效性验证以及最终建立适用于我国典型生态系统特征的碳水耦合循环模型提供研究基础。

2 材料和方法

2.1 研究区域概述

通榆观测实验站位于吉林省白城市通榆县新华乡的行政地域内, 位置为 ($44^{\circ}25'N$, $122^{\circ}52'E$),

处于白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区域，平均海拔高度为 184 m，实验区地形平坦。实验区以新华乡为中心，分别针对半干旱区农业和退化草地生态系统建立了两个观测点，空间距离在 5 km 左右^[14]。其中：

(1) 农田下垫面：位于新华镇北 2 km，周围近 2 km 范围无障碍物，上风向开阔。2003 年主要生长作物为玉米，生长季为 5~9 月。冬、春季农田为裸土覆盖，无作物，农田下垫面土壤主要为沙土和淡黑钙土。

(2) 退化草地下垫面：位于新华镇南 3 km 左右，地处松嫩平原中西部边缘，属于温性羊草草甸草原，主要植物群落组成有西伯利亚蒿和野谷草等^[21]。从 20 世纪 60 年代初开始出现草场退化，草原面积急剧减少，“三化”（沙化、碱化、退化）现象严重。退化草地下垫面土壤主要有盐碱土、草甸土和淡黑钙土^[14]。

2.2 数据获取

本研究所用数据主要包括 2003 年 1~12 月的通量数据（水热通量和 CO₂ 通量）以及主要气象资料。通榆站采用基于涡度相关技术的微气象法对湍流通量进行观测，湍流通量观测仪器由超声风速温度计、湿度和脉动仪组成，采样频率为 10 Hz；近地面基本气象要素观测仪器包括风速、温度和湿度传感器以及红外测温计，气象数据为 30 min 给出一组观测值，详细介绍参见文献 [14]。根据模型的输入条件，气象数据采用的是每小时平均值，由半小时观测资料计算得到；通量数据则根据模型输出，取的是日平均值和月平均值，其中 CO₂ 通量的单位分别为 mg · m⁻² · s⁻¹ (CO₂) 和 g · m⁻² · month⁻¹ (C)，水热通量的单位均为 W · m⁻²。所有计算和统计分析均借助 Excel 和 SPSS (SPSS for Windows V13.0) 软件完成。

3 模型描述

3.1 模型概述

IBIS (Integrated Biosphere Simulator) 模型是美国威斯康星大学全球环境与可持续发展中心 (SAGE) Foley 等^[8] 建立的一个基于动态植被模型的陆面生物物理模型，可以用于模拟生态系统

的碳、水和能量平衡，模型集成了大范围的生物物理、生理以及生态过程，通过一种独立、自然连续的模型框架结构表达出陆地表面生物物理、陆地碳通量和全球植被动态，并且这种模式框架能够直接与大气环流模式 (AGCMs) 进行耦合。

IBIS 模型最初模拟的是全球范围 50 年内的径流、NPP 和植被动态^[8]；经过 Kucharik 等人的检验与验证^[9]，Foley 等^[15] 尝试将 IBIS 模型与大气环流模式 GENESIS 进行耦合，模拟结果证实了动态植被模型与气候模型耦合的可行性。许多学者^[16~20] 在全球不同区域范围对模型进行校准和验证，并经过多次版本更新，发展到目前适合于不同研究目的，以小时为最高时间分辨率的最新版本 IBIS v2.6。

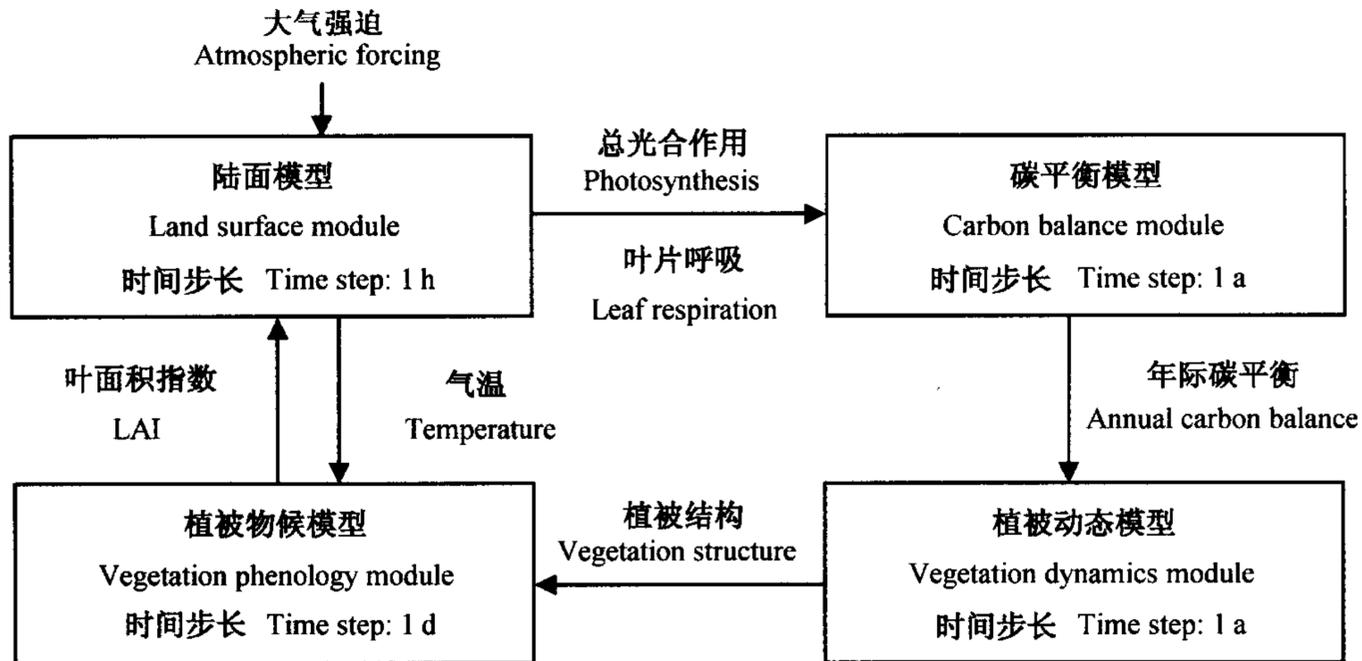
3.2 模型结构

IBIS 模型采用分级子模块的方式进行设计，按照运行时间步长的不同可分为陆面模型、植被物候模型、碳平衡模型和植被动态模型等 4 个子模块 (图 1)。

(1) 陆面过程模型以 Thompson 和 Pollard^[22,23] 的 LSX 模型为基础，使用 2 层植被 (树或者灌木和草)、6 层土壤剖面 (从顶部到底端分别是 0.10、0.15、0.25、0.50、1.00 和 2.00 m) 来模拟表面的能量、水、CO₂ 以及动量平衡。为了突出生物物理和生理过程变化在昼夜循环中的重要性，陆面模型采用相对较短的时间步长运行 (在 10~60 min 之间)，这与大气环流模式 (AGCMs) 所采用的步长比较接近 (主要分布在 20~30 min)。为减少计算所需条件，模型中陆面过程使用的时间步长为 1 h。

(2) 植被物候模块是以日为步长运行的，运用一种简单的经验公式来描述特定植物类型的冬落叶以及旱落叶行为与季节性气候条件之间的关系。冬落叶植物 (包括温带落叶林、北温带落叶林、寒带草甸和温带草原) 在日均温降低到指定的极限最低气温 (落叶林和温带草原是 5 °C 以下，寒带草甸是 0 °C 以下) 时，叶片发生脱落；在春季，当日平均温度增加到极限最低气温以上，叶片又重新长出。干旱落叶植物 (热带落叶林) 在每年光合作用产量最低的两个半月叶片发生脱落，同时也受前一年碳平衡的制约。

(3) 碳平衡模型综合了总光合速率、维持呼

图 1 集成生物圈模型的分级框架结构^[8,9]Fig. 1 Hierarchical framework of the Integrated Biosphere Simulator^[8,9]

吸以及生长呼吸，并由此计算 9 种植物功能型各自的年际碳平衡情况。每种植物功能型的年碳平衡是通过累加每小时的碳通量（总光合作用和维持呼吸作用）而计算得到的。

(4) 植被动态模型是从计算各植物功能类型的净初级生产力开始，模拟植被覆盖，由时间决定其变化，其主要来自于植物功能类型的净初级生产力、碳分配、生物生长率、死亡率以及生物体的转化所发生的变化等。

3.3 模型中的主要控制方程

(1) 光合作用

模型中光合作用模拟的基础是 Farquhar 的叶片尺度瞬时光合模型^[24]：

$$J_e = \alpha_3 Q_p \cdot \frac{C_i - \Gamma^*}{C_i + 2\Gamma^*}, \quad (1)$$

$$J_c = \frac{V_m (C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_c \left(1 + \frac{[O_2]}{K_o}\right)}, \quad (2)$$

$$J_s = 3T \left(1 - \frac{\Gamma^*}{C_i}\right) + \frac{J_p \Gamma^*}{C_i}, \quad (3)$$

式 (1)、(2) 和 (3) 分别为光限制、Rubisco 限制和磷酸丙糖利用限制的光合作用速率， Q_p 是叶片吸收的光合作用有效辐射的通量密度， α_3 是 C_3 植物本身吸收 CO_2 的效率， C_i 是叶片内部气体空间中的 CO_2 浓度， Γ^* 是光合作用补偿点（单位： $mol \cdot mol^{-1}$ ）， $[O_2]$ 是指大气中 O_2 浓度， V_m 是 Rubisco 酶进行羧化作用的最大能力（单位：

$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ）， K_c 和 K_o 是 CO_2 和 O_2 各自的 Michaelis-Menten 参数（单位： $mol \cdot mol^{-1}$ ）， T 是磷酸丙糖的利用率。总光合速率 A_g 取 J_e 、 J_c 和 J_s 中的最小值。

(2) 呼吸作用

叶片维持呼吸产生的 CO_2 生成速率 R_{leaf} （单位： $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ）由下式给出：

$$R_{leaf} = \gamma V_m, \quad (4)$$

这里 γ 是 Rubisco 酶用于叶片呼吸的能力消耗。

模型也计算了茎干和细根生物量的维持呼吸作用：

$$R_{stem} = \beta_{stem} \lambda_{sapwood} C_{stem,i} f(T_{stem}), \quad (5)$$

$$R_{root} = \beta_{root} C_{root,i} f(T_{soil}), \quad (6)$$

这里 β 定义为 $15^\circ C$ 时的维持呼吸系数， $\lambda_{sapwood}$ 是茎干生物量中边材的比例， $f(T)$ 是 Arrhenius 温度函数：

$$f(T) = e^{E_0 \left(\frac{1}{15-T_0} - \frac{1}{T-T_0}\right)}, \quad (7)$$

其中， T 是器官温度（根部生长的土壤温度）， E_0 是温度敏感因子， T_0 设为绝对零度（ $-273.16^\circ C$ ）^[25]。

对于每种植物功能类型 i ，总初级生产力（GPP， G ）和净初级生产力（NPP， N ）：

$$G_i = \int A_{g,i} dt, \quad (8)$$

$$N_i = (1 - \eta) \int (A_{g,i} - R_{leaf,i} - R_{stem,i} - R_{root,i}) dt, \quad (9)$$

方程中 η (0.33 或 0.30) 表示植被生长呼吸消耗的碳占总碳的比例^[8,9]。

3.4 模型输入输出与参数化

IBIS 模型输入条件主要有大气温度、相对湿度、云量、降水和风速等气象变量, 以及植被覆盖, 土壤质地, 地形等。输出内容包括 GPP、NPP、净生态系统碳交换 (NEE)、感热和潜热通量, 蒸发散和蒸腾作用以及碳氮在植被、凋落物和土壤有机质中的分配分布情况等。

模型中所需的参数主要有土壤质地、土壤有机质含量、凋落物库量、田间持水量和持续萎蔫点等。通榆站土壤类型为草甸碱土亚类的岗碱土土属, 土壤质地为砂质壤土 (Sandy loam), 由 IBIS 模型中所使用的土壤质地分类及组成^[26] 可知, 对应的土壤质地组成为含砂 65%、粘土 10%、粉质砂土 25%。同时, 为了使模型能够准确模拟通榆站草原和农田生态系统的通量特征, 对 IBIS 模型相应的植被和土壤参数做了调整, 所采用的主要参数和取值列于表 1。表中最大叶面积指数取自参考文献 [27], 初始凋落物量和土壤有机质来自实际测定, 其测定时间是 2003 年 1 月 1 日, 其余参数取值主要由 CEOP 计划给出。

4 结果分析

4.1 气象变量的变化特征

大气温度、相对湿度、降水和风速等气象变量作为 IBIS 模型的主要驱动变量, 其变化情况直接影响着模型的输出结果。图 2 给出了 2003 年吉林通榆观测站草地生态系统的降水, 1.5m 高度

上大气温度和相对湿度, 以及 2m 高度上风速的年变化情况。其中 4 月 21 日~5 月 11 日数据缺失, 模拟应用中采用通榆气象站 2003 年观测资料进行数据补缺 (由于退化草地和农田下垫面的空间距离为 5 km 左右, 观测期间两个观测点总是处在同一天气系统控制下, 故略去农田生态系统气象条件的特征介绍)。

由图 2 可以看出: 2003 年通榆观测站所处地区的年平均气温为 6.37 °C, 最高日平均气温为 28.55 °C, 最低气温为 -22.23 °C (图 2a); 在非生长季 (1~3 月和 10~12 月), 空气湿度相对于生长季 (4~9 月) 要小, 变化范围从 11.10%~95.61%, 并存在明显的日变化 (图 2b); 雨季主要集中在 6~9 月, 年降水量达到 311.7 mm (图 2c), 低于该地区多年平均年降水量约 78.3 mm^[28]; 冬春季风速较大, 存在明显日变化, 最大日平均风速可达到 11.26 m·s⁻¹ (图 2d)。

4.2 模拟验证结果

在具体确定模型所需的主要参数后, 运用 IBIS 模型模拟了通榆观测站农田和草地生态系统 2003 年全年的 CO₂、感热和潜热通量, 并与涡度相关系统测得的实际观测值进行对比分析, 检验 IBIS 模型的模拟能力。

4.2.1 CO₂ 通量

在研究植被与大气之间的 CO₂ 交换时, 如果不考虑由于冠层储存的影响, 通常以涡度相关系统测定的结果即 NEE 来表示生态系统的 CO₂ 通量。图 3 给出了 2003 年通榆观测站草地和农田生态系统 NEE 的逐日模拟变化情况 (其中, 草地生态系统 1 月通量观测数据缺失)。从图中可以看出, CO₂ 通量曲线呈现明显的开口向上抛物线,

表 1 模型中主要植被和土壤参数

Table 1 Main parameter values of vegetation and soil used in IBIS

参数 Parameter	取值 Values		来源 Sources
	草地 Grassland	农田 Cropland	
最大叶面积指数 Maximum of leaf area index/m ² ·m ⁻²	3.2	4.2	文献 [27] Reference [27]
最大地上生物量 Maximum of above-ground biomass/kg·m ⁻² (C)	0.23	0.30	CEOP
最大地下生物量 Maximum of under-ground biomass/kg·m ⁻² (C)	0.27	0.16	CEOP
初始凋落物库量 Initial litter/kg·m ⁻² (C)	0.40	0.65	实测值 Measured
初始土壤有机质 Initial soil organic matter/kg·m ⁻² (C)	6.0	6.0	实测值 Measured
田间持水量 Field capacity/cm	28	28	CEOP
持续萎蔫点 Wilting point/cm	12	12	CEOP

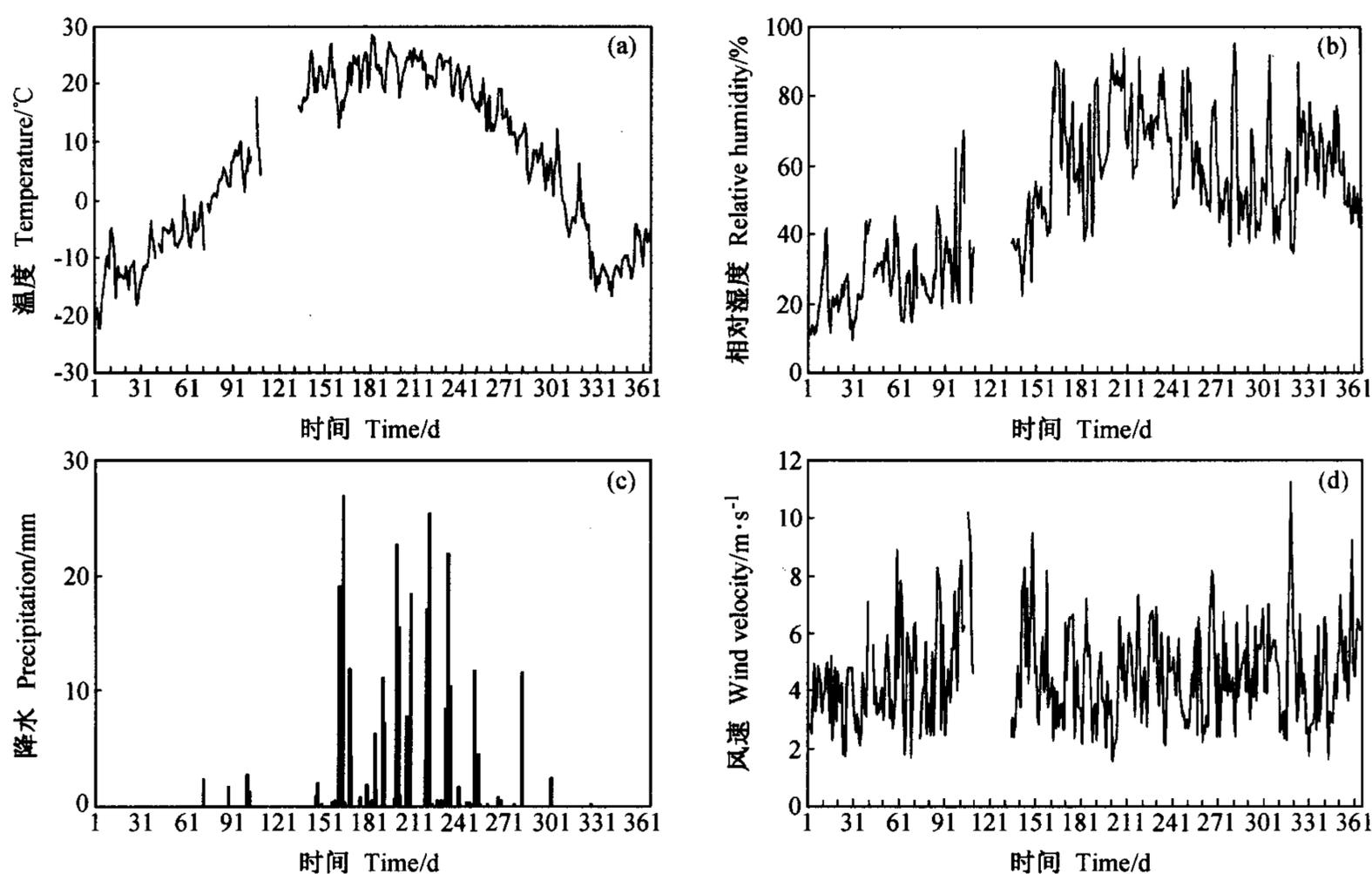


图2 2003年通榆观测站草地生态系统的气象条件：(a) 大气温度；(b) 相对湿度；(c) 降水；(d) 风速。(a)、(b)、(d) 为日平均值，(c) 为日总量

Fig. 2 Meteorological conditions of grassland ecosystem in Tongyu observation station in 2003: (a) air temperature, (b) relative humidity, (c) precipitation and (d) wind velocity, in which (a), (b) and (d) are daily mean values while (c) is daily amount

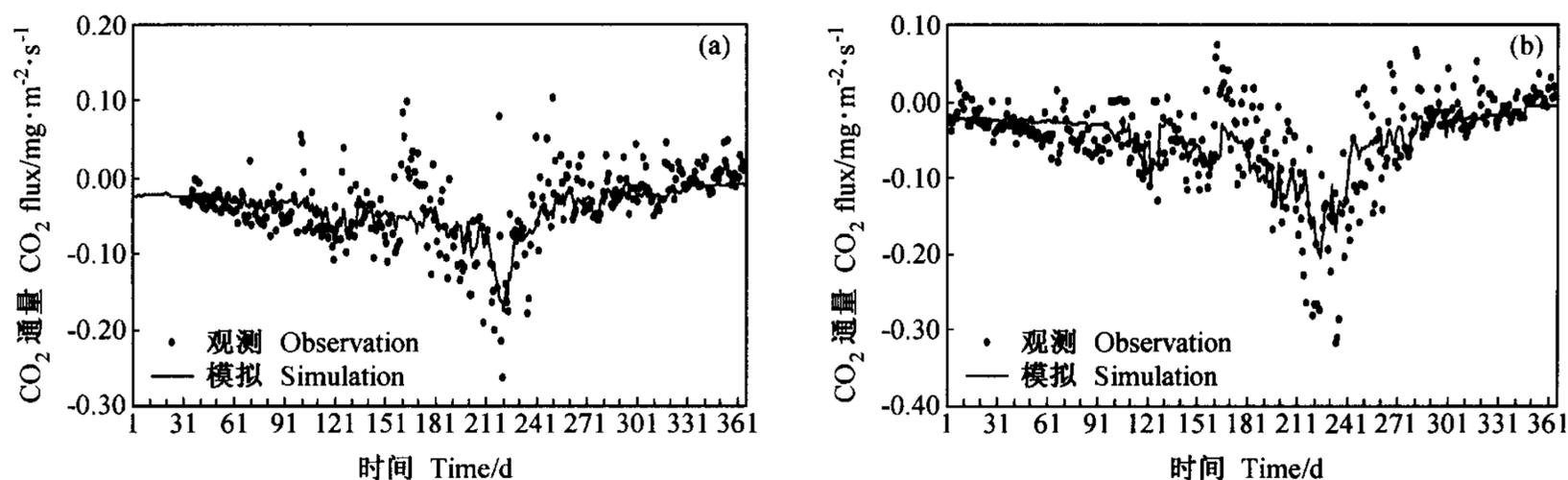


图3 2003年通榆观测站 CO₂通量 (NEE) 的逐日模拟值与实际观测值的比较：(a) 草地生态系统；(b) 农田生态系统

Fig. 3 Daily average of simulated and observed CO₂ flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

这与 Amthor 等^[29]、莫兴国等^[30] 相关报道基本相符；NEE 大多为负值，表明该地区生态系统主要表现为较弱的碳汇性质。IBIS 模型模拟值的变化趋势大致表现为生长季（4~9 月）要明显大于非生长季（1~3 月、10~12 月），同时可以看出，模型在 8 月的模拟均为负值偏低，且相差幅度较大。在冬春非生长季节，植被与大气之间的 CO₂

交换几乎为 0，NEE 的变化幅度较小。

比较结果表明，IBIS 模型模拟的 NEE 与实测 CO₂ 通量之间相关性不是很理想，草地和农田生态系统的相关系数 (R^2) 分别为 0.416 和 0.507，且均通过了显著水平为 0.05 的信度检验。Delire 和 Foley^[16] 曾用 IBIS 模型对 FIFE 观测试验第 16 号站点 [位于美国堪萨斯大草原 (39°03'N, 96°32'E)]

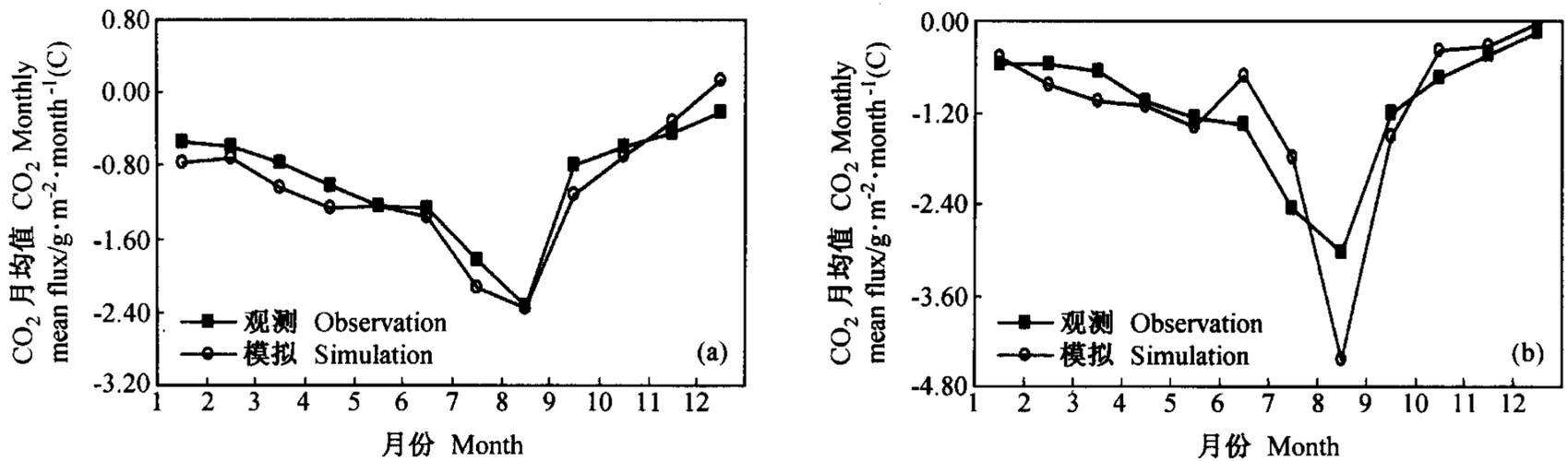


图4 2003年通榆观测站CO₂通量模拟与观测的月变化：(a)草地生态系统；(b)农田生态系统
Fig. 4 Monthly variation of simulated and observed CO₂ flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

进行NEE的模拟，结果表明，晴朗天气条件下NEE的模拟最好，夜间的则多数不够准确，并且从总体上看，模拟与观测的相关性一般。通榆站的模拟情形与之基本相似，说明IBIS模型对NEE的模拟能力还有待于进一步改进和提高。

由2003年通榆观测站CO₂通量模拟值与观测值的月变化(图4)可知，两者的变化趋势基本一致，以8月为极值点，呈抛物线变化。对于草地而言，5~6月和8、10月的模拟与观测平均值比较相符，其他月份均存在一定偏差；农田生态系统中除1、5月和12月基本一致外，其他月份均存在一定的偏差，尤其是6~8月，偏差幅度较大。引起这些偏差的具体原因尚不明确，可能原因之一就是草地的严重退化导致在生长期的模拟与实际相比，NEE绝对值要偏大；农田在6~8月出现的情况，可能是由于主要农作物玉米在此期间处于生长上升阶段，光合碳吸收作用比较强。从年变化的总体来看，草地生态系统CO₂通量模拟值的年累加为-326.38 g·m⁻²·a⁻¹(C)，与观测值-359.82 g·m⁻²·a⁻¹(C)相比，绝对值要偏低9.29%；农田中对应的CO₂模拟年累加值为-439.33 g·m⁻²·a⁻¹(C)，其绝对值要小于观测的-456.19 g·m⁻²·a⁻¹(C)，偏低3.73%。

4.2.2 感热通量

图5给出了模拟与实测的2003年通榆观测站的感热通量日平均值。其中，草地生态系统观测的感热通量最大日平均值为76.54 W·m⁻²(第158天)，最小值为-20.41 W·m⁻²(第352天)；模拟值的变化范围相对较小，为0.52~68.48

W·m⁻²。农田观测的最大值为80.99 W·m⁻²(第178天)，最小值为-18.27 W·m⁻²(第354天)；模拟值在0.69~67.78 W·m⁻²之间变化。从图中还可以看出，农田生态系统的感热通量值大于草地，这与不同下垫面性质有关；同时由于两者处在同一天气系统控制下，多数输入条件比较相近，使得农田和草地感热通量模拟值的变化趋势基本一致。

Delire和Foley^[16]应用IBIS模型对HAPEX-MOBILHY实验地(位于法国东南部的一块大豆田(43°41'N, 0°6'W))和Cabauw[位于荷兰境内的一片草地(51°58'N, 4°56'E)]的感热通量进行模拟，结果表明：模拟值与观测值之间的相关性基本一致。在本研究中，由模拟值与观测值的比较可知，IBIS模型较好地模拟了通榆站草地和农田生态系统的感热通量，模拟值与实测值之间具有较好的相关性(R²分别为0.762和0.727)，均通过了显著水平为0.01的信度检验。这进一步验证了模式能够较好地模拟农田和草地生态系统的感热通量。

从2003年感热通量模拟与观测的年变化(图6)来看，模拟与观测的年变化趋势基本一致：草地生态系统中，除1~2月和11~12月存在一定偏差外，其他月份基本相符；农田中，除8月和12月模型高估观测较多以外，其他月份之间存在很好的一致性。总体来看，模型模拟较观测值均要偏高：模型模拟的感热通量年累加值分别达到9 107.16 W·m⁻²(草地)和10 234.05 W·m⁻²

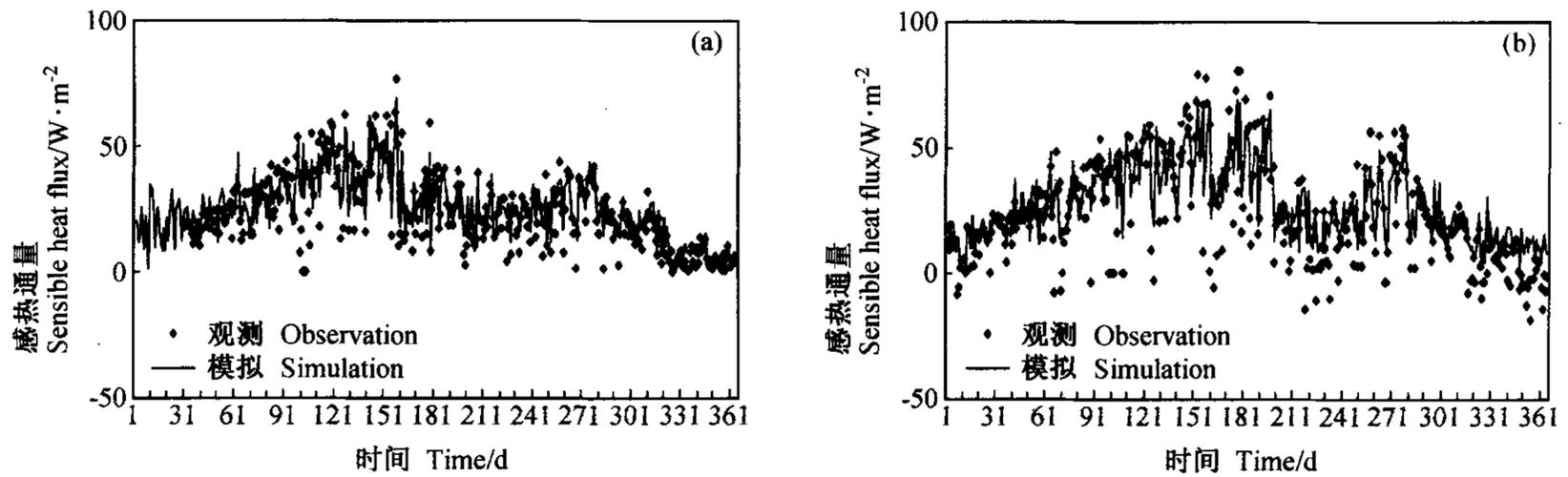


图5 2003年通榆观测站感热通量(SH)的逐日模拟值与实际观测值的比较:(a)草地生态系统;(b)农田生态系统

Fig. 5 Daily average of simulated and observed heat flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

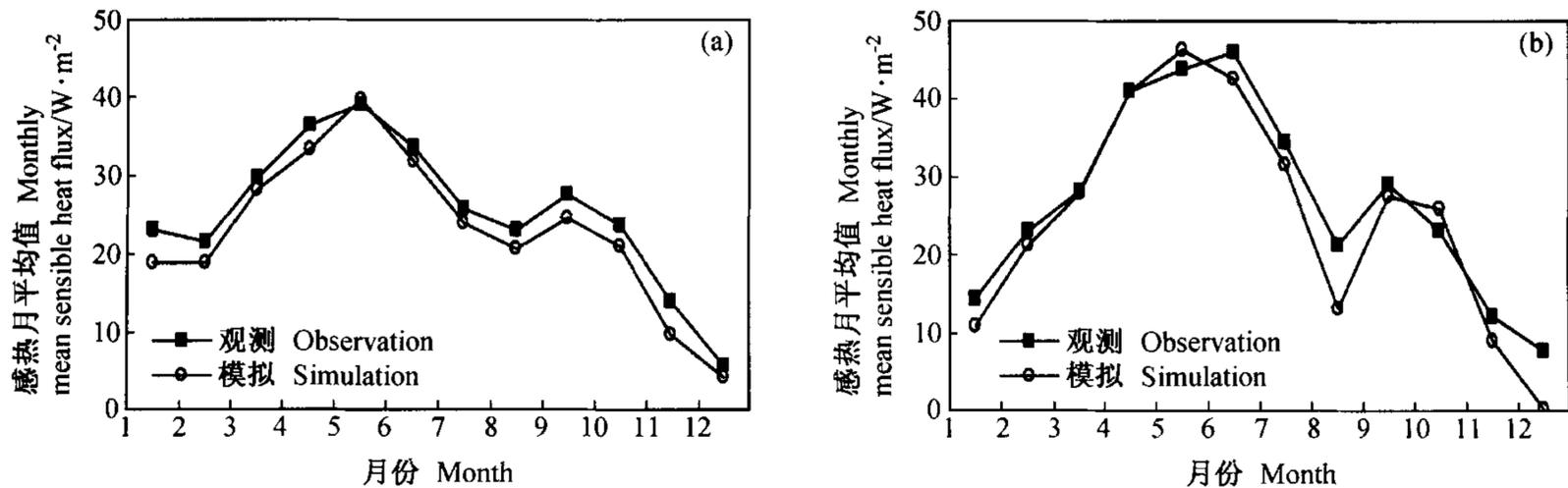


图6 2003年通榆观测站感热通量模拟与观测的年变化:(a)草地生态系统;(b)农田生态系统

Fig. 6 Annual variation of simulated and observed sensible heat flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

(农田),要大于对应观测的 $8\ 286.49\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (草地)和 $9\ 138.39\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (农田),分别偏高 9.90% 和 11.98% 。同时,从季节变化特征来看,感热通量观测值的年变化趋势为双峰形,两个峰值分别位于5月和9月,以5月最大,与刘晶森等^[31]报道的研究结果基本类似;草地感热通量模拟值的分布与观测基本相同,而农田模拟的峰值分布则分别位于6月和9月,以6月最大。引起这一现象的原因可能是农田作物(主要是玉米)在6月处于生长旺盛期;随后由于雨季的来临,降水增加,感热会逐渐减小,直到9月的成熟期,感热通量再次增加。

4.2.3 潜热通量

图7给出的是模拟与观测的2003年通榆观测站的潜热通量日平均值。由于通榆观测站地处半干旱区,在非生长季,空气非常干燥,同时农田下垫面是裸土覆盖,使得退化草地和农田的不同

下垫面近地面层能量收支基本一致。在生长季,模拟的农田潜热通量要大于退化草地,变化幅度约为草地的两倍。造成这种现象的原因可能是,模式中将农田和草地划分到同一类中,而通榆站的实际情况是草地退化比较严重,下垫面裸露较多,夏季的草一般在10 cm以下,冬春季在5 cm以下;农田下垫面在生长季则是高粱和玉米覆盖,非生长季是裸土。这样的差异可能使得模型在生长季对草地潜热通量的模拟要比农田偏低些。

通过模型模拟与实测潜热通量的比较发现,模型很好地模拟了2003年通榆观测站的潜热通量变化,模拟值与观测值之间存在较强的相关性,其相关系数分别达到0.825和0.838,均通过了显著水平为0.01的信度检验。Delire和Foley^[16]曾应用IBIS模型对HAPEX-MOBILHY实验地和FIFE观测试验第16号站点的潜热通量进行模拟,结果显示模拟值与实际观测值之间呈现较一致的

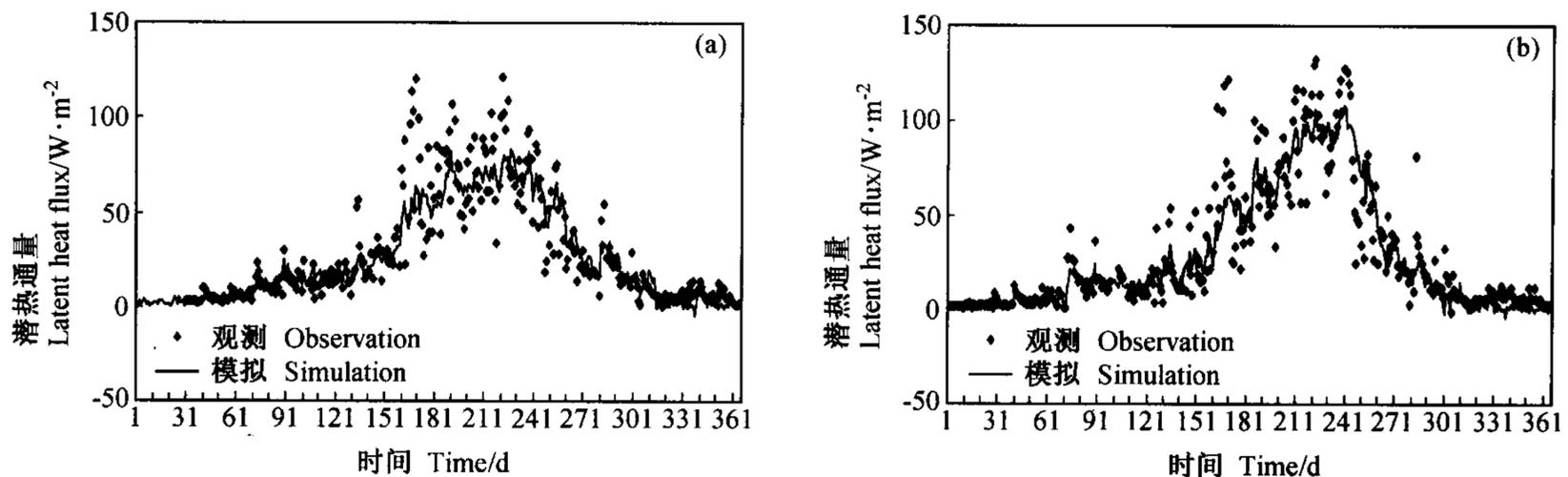


图7 2003年通榆观测站潜热通量(LH)的逐日模拟值与实际观测值的比较:(a)草地生态系统;(b)农田生态系统

Fig. 7 Daily average of simulated and observed latent heat flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

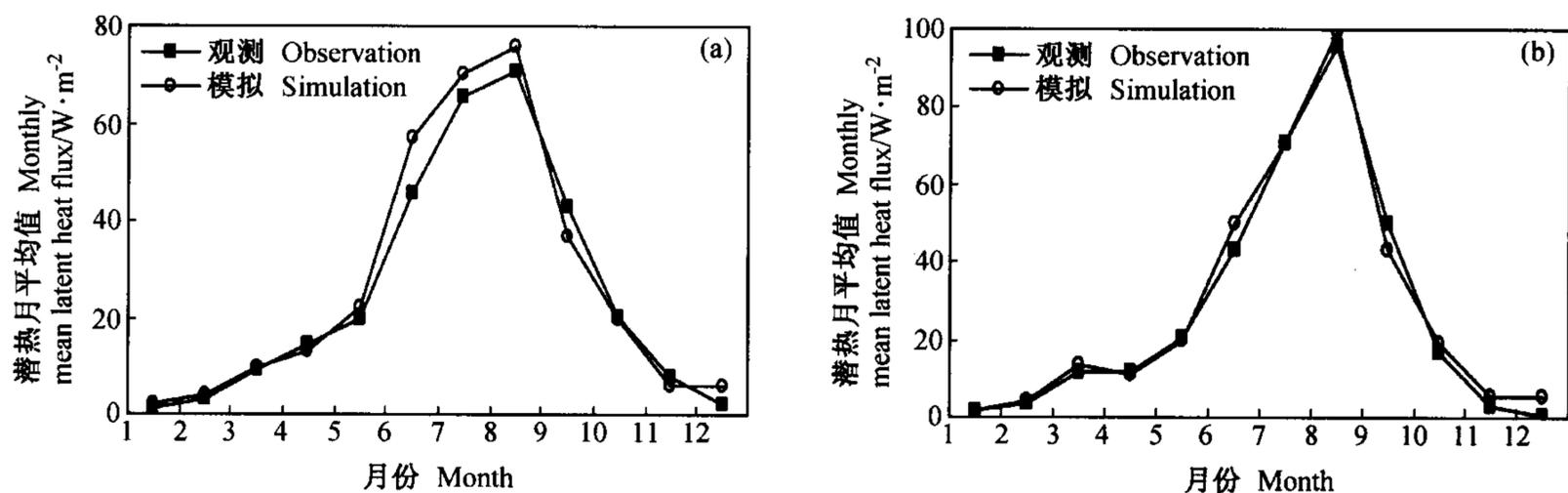


图8 2003年通榆观测站潜热通量模拟与观测的年变化:(a)草地生态系统;(b)农田生态系统

Fig. 8 Annual variation of simulated and observed latent heat flux in Tongyu observation station in 2003: (a) grassland ecosystem and (b) cropland ecosystem

相关性。这也再次说明 IBIS 模型对农田和草地生态系统潜热通量的模拟能力较强。

由图 8 给出的 2003 年通榆观测站潜热通量模拟与观测的年变化情况可知, 两者的变化趋势完全一致, 除个别月份(草地的 6 月、9 月和农田的 8 月、9 月)存在偏差外, 其他月份基本相符。总体上看, 潜热通量模拟值的年累加为 $9\ 325.62\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (草地) 和 $10\ 161.41\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (农田), 与观测的年累加值 $9\ 778.16\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $10\ 527.51\ \text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 相比, 要分别偏低 4.63% 和 3.48% 。从季节变化特征来看, 潜热通量的年变化趋势呈现为单峰形, 模拟和观测的峰值均出现在 8 月, 其次是 7 月, 这与大气温度的变化趋势基本吻合; 同时, 通榆观测站的潜热通量最大月份与其降水量最多的月份也相一致, 均出现在 8 月, 这与余锦华等^[32] 给出的研究报告完全相符。

5 结论与讨论

本文通过应用 IBIS 模型对吉林通榆观测实验站的 CO₂ 和水热通量进行模拟, 并将模拟结果与涡度相关测定的数据资料进行对比分析, 检验 IBIS 模型的模拟能力。主要研究结果表明:

(1) 模型基本能够较好地模拟通榆观测站的 CO₂ 和水热通量: 除了对 CO₂ 通量的模拟结果不够理想以外(退化草地和农田的模拟-观测相关系数分别为 0.416 和 0.507), 对于感热和潜热通量的模拟表明, 应用 IBIS 模型可以较好地模拟通榆站的水热通量, 退化草地的模拟-观测相关系数分别达到 0.762 和 0.825, 农田为 0.727 和 0.838 (所有相关分析均通过了 0.05 以上显著水平的信度检验)。

(2) 经年变化分析得出, 模型分别低估 CO₂ 通量 (偏低 9.29% 和 3.73%) 和潜热通量 (偏低 4.63% 和 3.48%), 对感热通量则是高估 (偏高 9.90% 和 11.98%)。

(3) 从总体上看, 模型对农田生态系统模拟的偏差比对退化草地的模拟要小。

一般而言, 近地面 CO₂ 通量及感热、潜热等湍流能量通量的变化与地面生态环境、自然和人为 CO₂ 及热量排放源汇有密切关系^[33]。通榆地区属于半干旱区, 其观测实验区处于生态脆弱带, 生态环境对人类活动比较敏感, 进而可能会影响到通量数据的观测。

IBIS 模型对通榆站 CO₂ 通量的模拟结果相对要差些 (大多情况是模拟偏高), 有研究指出, 涡度相关法可以直接测定植被与大气间 CO₂、水热通量, 但在夜间大气层比较稳定、湍流较弱时, 从土壤和叶片扩散的 CO₂ 不能到达仪器测定高度, 仪器测定的准确性降低导致夜间 CO₂ 通量值偏低^[34]。同时, 绝大部分 CO₂ 通量观测站点都处于非典型的理想条件下, 不能完全满足涡度相关技术的基本假设条件, 从而导致基于涡度相关技术估算植被/大气间净生态系统 CO₂ 交换量的不确定性^[35], 主要包括仪器本身的物理限制、二维和三维气流运动的影响、数据处理以及夜间通量测定中引起的不确定性等。通榆观测站实验区所处的农田和退化草地下垫面, 不能完全满足涡度相关技术所要求的地形平坦、下垫面均匀以及四周开阔等条件; 观测仪器 (特别是超声风速温度计) 也不能保证长期保持绝对垂直, 这些都可能对通量观测产生一定影响。

IBIS 模型对通榆观测站潜热通量的模拟结果要好于感热通量, 这与 Kucharik 等^[9] 以及 Delire 等^[16] 给出的模型验证结果基本相符。模型对水热通量的模拟在部分时段还存在较大的偏差。可能的原因是, 模型的有效性验证使用的是由涡度相关法实测的水汽通量数据, 而据已有研究报道, 目前涡度相关法所观测的能量收支不闭合, 可能是因为平流、植物体储热以及地表通量观测误差等影响导致水汽通量观测值偏低 20% ~ 30%^[36~38]。同时, 影响感热通量变化的因子主要为用于感热消耗的能量、地表湿润状况、下垫面性质等^[31]。一般情况下, 总云量越多, 感热和潜

热通量则越小; 有雨时感热通量和潜热通量的值较小, 在紧接其后的无雨阶段其值达到极大值^[39]。而 IBIS 模型对云量和降水的影响表现不明显, 加之本研究比较的是各通量日平均以及月平均值的变化, 因而不能很好地反映出其变化趋势。今后, 模型的这些方面仍需要通过更大尺度范围的应用验证, 以作进一步的改进和完善。

致谢 感谢美国威斯康星大学全球环境与可持续发展中心 Foley 教授为本研究提供模型的源程序和测试数据。

参考文献 (References)

- [1] Friend A D, Stevens A K, Knox R G, et al. A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3. 0). *Ecological Modeling*, 1997, **95**: 249~287
- [2] 延晓冬. 地球系统碳循环的基本模型. 见: 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞主编, 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004. 357~386
Yan Xiaodong. Fundamental models of carbon cycles in the earth system. In: *Carbon Cycles in the Earth System* (in Chinese). Chen Panqin, Huang Yao, Yu Guirui, Ed. Beijing: Science Press, 2004. 357~386
- [3] 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO₂ 和水热通量的模拟研究. 中国科学 (D 辑), 2004, **34** (增刊 II): 131~140
Wang Qiufeng, Niu Dong, Yu Guirui, et al. Simulation study of CO₂ and moisture and heat flux in Changbai Mountain forest ecosystem. *China Science* (Ser. D) (in Chinese), 2004, **34** (Suppl. II): 131~140
- [4] Dickinson R E, Henderson S A, Kennedy P J, et al. Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM. NCAR/TN-275-STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1986
- [5] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modeling*, 1988, **42**: 125~154
- [6] Running S W, Hunt E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes. BIOME-BGC and an application for global-scale models. In: *Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe*. Ehleringer J R, Field C B, Ed. San Diego: Academic Press, 1993. 141~158
- [7] Ji Jinjun. A climate-vegetation interaction model: simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 445~451

- [8] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (4): 603~628
- [9] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, **14** (3): 795~826
- [10] 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. Climate*, 1996, **9** (4): 676~705
- [11] McGuire A D, Mellio J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of global net primary production and carbon storage to doubled atmospheric carbon dioxide: sensitivity to changes in vegetation nitrogen concentration. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, **11**: 173~189
- [12] McGuire A D, Mellio J M, Randerson J T, et al. Modeling the effects of snowpack on heterotrophic respiration across northern temperate and high latitude regions: Comparison with measurements of atmospheric carbon dioxide in high latitudes. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 91~114
- [13] Baldocchi D, Valentini R, Oechel W, et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapor fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biol.*, 1996, **2**: 159~168
- [14] 刘辉志, 董文杰, 符淙斌, 等. 半干旱地区吉林通榆"干旱化和有序人类活动"长期观测实验. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 378~389
Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. The Long-Term Field Experiment on Aridification and the Ordered Human Activity in Semi-Arid Area at Tongyu, Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 378~389
- [15] Foley J A, Levis S, Prentice I C, et al. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 561~579
- [16] Delire C, Foley J A. Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (D14): 16, 895~16, 909
- [17] Maayar M E, Price D T, Delire C, et al. Validation of the integrated biosphere simulator over Canadian deciduous and coniferous boreal forest stands. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D13): 14, 339~14, 355
- [18] Maayar M E, Price D T, Andrew Black T, et al. Sensitivity tests of the integrated biosphere simulator to soil and vegetation characteristics in a Pacific coastal coniferous forest. *Atmos.-Ocean*, 2002, **40** (3): 313~332
- [19] Maayar M E, Kucharik C. Simulation of the seasonal and interannual variability of carbon and water cycles within three mid-latitude forests using a dynamic global vegetation model. Paper Presented at the Annual Meeting of the American Geophysical Union (AGU), San Francisco, CA, December 2003
- [20] Li K Y, Coe M T, Ramankutty N. Regional hydrological modeling in Africa: Calibration and performance test of I-BIS. *Geophysical Research Abstracts*, 2003, **5**: 13006
- [21] 李建东, 杨允菲. 松嫩平原羊草草甸植物的生态及分布区型结构分析. 草业学报, 2002, **11** (4): 10~20
Li Jiandong, Yang Yunfei. Analysis on structures of ecological and areal types for plant species in *Leymus chinensis* meadow in the Songnen Plains of China. *Acta Prataculturae Sinica* (in Chinese), 2002, **11** (4): 10~20
- [22] Thompson S L, Pollard D. A global climate model (GENESIS) with a land-surface-transfer scheme (LSX). Part 1: Present-day climate. *J. Climate*, 1995, **8**: 732~761
- [23] Thompson S L, Pollard D. A global climate model (GENESIS) with a land-surface-transfer scheme (LSX). Part 2: CO₂ sensitivity. *J. Climate*, 1995, **8**: 1104~1121
- [24] Farquhar G D, Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 1980, **149**: 78~90
- [25] Collatz G J, Ball J T, Griwet C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1991, **54**: 107~136
- [26] Rawls W J, Ahuja L R, Brakensiek D L. Estimating soil hydraulic properties from soils data. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Riverside, CA, Proceedings 329~341
- [27] 赵茂盛, Neilson R P, 延晓冬, 等. 气候变化对中国植被可能影响的模拟. 地理学报, 2002, **57** (1): 28~38
Zhao Maosheng, Neilson R P, Yan Xiaodong, et al. Modelling the vegetation of China under changing climate. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57** (1): 28~38
- [28] 刘志良. 通榆县干旱气候分析. 吉林气象, 2002, **4**: 20~21
Liu Zhiliang. Analysis of dry climate in Tongyu County. *Jilin Qixiang* (in Chinese), 2004, **4**: 20~21
- [29] Amthor J S, Chen J M, Clein J S, et al. Boreal forest CO₂ exchange and evapotranspiration predicted by nine ecosystem process models: Inter-model comparisons and relationships to field measurements. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (24): 33623~33648
- [30] 莫兴国, 陈丹, 林忠辉, 等. 不同水分条件麦田能量和 CO₂ 通量变化特征研究. 中国生态农业学报, 2003, **11** (4): 77~81
Mo Xingguo, Chen Dan, Lin Zhonghui, et al. Study on en-

- ergy and CO₂ fluxes over white wheat fields with different water treatments. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (in Chinese), 2003, **11** (4): 77~81
- [31] 刘晶淼, 周秀骥, 余锦华, 等. 长江三角洲地区水和热通量的时空变化特征及影响因子. *气象学报*, 2002, **60** (2): 139~146
Liu Jingmiao, Zhou Xiujie, Yu Jinhua, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of evapotranspiration and sensible heat fluxes and influence factors in the Yangtze Delta region. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (2): 139~146
- [32] 余锦华, 刘晶淼, 丁裕国. 青藏高原西部地表通量的年、日变化特征. *高原气象*, 2004, **23** (3): 353~359
Yu Jinhua, Liu Jinmiao, Ding Yuguo. Annual and diurnal variations of surface fluxes in western Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 353~359
- [33] 陆龙骅, 程彦杰, 卞林根, 等. 长江三角洲典型稻作区近地层二氧化碳等湍流通量的观测研究. *地球物理学报*, 2003, **46** (6): 751~759
Lu Longhua, Cheng Yanjie, Bian Linggen. A study on the turbulence fluxes of the surface layer CO₂, sensitive and latent exchange over the typical rice field, Changjiang Delta. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2003, **46** (6): 751~759
- [34] 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO₂ 通量的测定. *地理学报*, 2002, **57** (3): 333~342
Zhang Yongqiang, Shen Yanjun, Liu Changming, et al. Measurement and analysis of water, heat and CO₂ flux from a farmland in the North China Plain. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2002, **57** (3): 333~342
- [35] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性. *地球科学进展*, 2004, **19** (4): 658~663
Wen Xuefa, Yu Guirui, Sun Xiaomin. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO₂ exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2004, **19** (4): 658~663
- [36] Peter van der Keur, Kirsten Schelde. Modification of DAISY SVAT model for potential use of remotely sensed data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **106**: 215~231
- [37] Kell Wilson, Allen Goldstein, Eva Falge, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **113**: 223~243
- [38] 孙志刚, 王勤学, 欧阳竹, 等. MODIS 水汽通量估算方法在华北平原农田的适应性验证. *地理学报*, 2004, **59** (1): 49~55
Sun Zhigang, Wang Qinxue, Ouyang Zhu, et al. Validation of the feasibility of MODIS algorithm for estimating crop field vapor flux in North China Plain. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **59** (1): 49~55
- [39] 胡国权, 丁一汇. HUBEX 试验期间不同地面的能量收支研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 228~233
Hu Guoquan, Ding Yihui. A study on energy budget over Huaihe River Basin during HUBEX. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 228~233