

应用 BIOME-BGC 模型研究典型生态系统的潜热通量 ——半干旱地区吉林通榆的模拟

王超^{1,2} 延晓冬² 黄耀^{1,3} 刘辉志³

1 南京农业大学资源与环境学院, 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, 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 年降雨量和年蒸发量在某种程度上反映了区域内水资源的丰富程度。随着社会和经济的发展, 我国东北西部半干旱区的水资源供需矛盾日益突出。作者应用 BIOME-BGC 模型模拟了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半干旱地区吉林通榆 2002 年 10 月~2003 年 9 月草地和农田生态系统的潜热通量, 并将模拟结果与通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站涡度相关法测定的观测值进行了比较, 结果表明两者基本一致。此外, CEOP 的观测数据对模型的验证和改进具有重要意义, 半干旱区水资源的合理利用须引起当地政府和群众的重视。

关键词 BIOME-BGC 模型 潜热通量 通榆站 半干旱地区

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0404-09 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

With BIOME-BGC Model on the Latent Heat Fluxes of the Typical Ecosystem: Simulations in Semi-arid Area at Tongyu, Jilin Province

WANG Chao^{1,2}, YAN Xiao-Dong², HUANG Yao^{1,3}, and LIU Hui-Zhi³

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

2 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 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 yearly rainfall and evaporation quantitatively reflects the abundance of water resources in a region to a certain degree. Along with the development of the society and the economy in the western part of Northeast China, the conflicts between water resources supply and demand is increasingly obvious in the semi-arid area. This paper used the BIOME-BGC model to simulate latent heat fluxes of grassland and farmland ecosystem at Tongyu of Jinlin Province, and compare the simulations with the observations from the long-term station on aridification and the ordered human activity. This observation station is also one of the reference sites of Coordinate Enhanced Observation Period (CEOP). The CEOP datasets is significant in validating and improving the model. The reasonable use of water resources in semi-arid area should be paid more attention to by the local government and people.

Key words BIOME-BGC model, latent heat flux, Tongyu, semi-arid area

收稿日期 2006-03-16 收到, 2006-04-10 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 KZCX-SW-218 和国家重点基础研究发展规划 2002CB412503

作者简介 王超, 女, 1982 年出生, 硕士, 主要从事生态系统碳、水循环方面的研究。E-mail: wangc@tea.ac.cn

1 引言

地表通量中的感热和潜热是众多数值天气预报、区域气候模型和区域水文模型的重要过程变量,也是农业生态研究、森林生态研究、城市绿地生态效应研究中的重要指标。目前,干旱区缺水状况^[1]、区域生物碳循环、数值天气预报、全球变化、作物估产等相关领域迫切需要得到这些变量作为关键性输入参数^[2]。半干旱地区是一个过渡带,比较脆弱,易受气候变化和人类活动的影响,该地带水量平衡尤其重要^[3]。年降雨量和年蒸发量在某种程度上反映了区域内水资源的丰富程度,特别是环境脆弱程度^[4]。随着社会和经济的发展,水资源供需矛盾将日益突出,水资源的匮乏不但影响着当地工农业的发展,而且因干旱化导致的荒漠化(沙漠化、盐渍化及草场退化)^[5,6]不断加剧,生态环境问题已日益受到关注。

另一方面,由于我国东北地区水资源主要靠大气降水补给^[7],受天气气候变化的影响极大,特别是 1999、2000 和 2001 年连续 3 年的大范围持续性干旱,给国民经济发展和生态环境造成了严重影响。有研究表明,20 世纪 90 年代以来,由于气温上升和降水量减少,东北地区(特别是西部)暖干气候趋势明显,地表干旱化进一步发展^[8,9]。2000 年 5~6 月,符淙斌等^[10]通过对东北地区西部进行实地考察和调研,分析得到降水量减少是该地区干旱化的一种表现,导致了生态环境恶化。在人类活动作用下(本文主要考虑土地利用),植被-大气-水文过程如何相互作用,这是研究北方干旱化的发展及其形成机理必须要回答的重要问题。

本文旨在充实我国 BIOME-BGC 模型对典型生态系统潜热通量的模拟研究工作,通过对局部小范围的模拟,检验模型在中国的模拟性能;准确地测定和估算潜热通量,不仅对研究全球气候演变、环境问题以及水资源评价等有着重要的意义,而且对指导农业的排水与灌溉、监测农业旱情、提高农业水资源的利用率等的意义也十分重大。

2 模型与方法

2.1 研究场地

现有数据为通榆站近地面层微气象及通量观测数据(2002 年 10 月~2003 年 9 月)。通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站位于吉林省白城市通榆县新华乡的行政地域内,同时也已被纳入国际协调强化观测计划(CEOP)的观测网^[11],是 CEOP 计划亚洲季风比较研究(CAMP)的一个地面观测基准站(www.ceop.net),可为全球水资源及气候变化研究提供资料和协同分析。这对于研究区域能量和水分循环,预测我国北方干旱化趋势有重要作用。实验站地理位置为(44°25'N, 122°52'E),处在白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区,平均海拔高度为 184 m,实验区地形非常平坦,无长年流水的河流,唯有霍林河、额门太河的支流及文牛格尺河等 3 条季节性无尾河,除丰水年外,基本处于无水状态。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 2 个观测点,2 点空间距离在 5 km 左右,观测项目完全一致,几乎同时观测。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,2 km 外有零星田间林网,上风向开阔,地形平坦。主要作物为玉米和高粱,生长季为每年 5~10 月,10 月初收割完毕。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,一大片因过牧而退化的草地面积近 3 km×4 km,草地周围已经开垦了不少农田,其中含有已经开垦但 2002 年开始弃耕的农田。退化草地上的草高度夏季一般在 10 cm 以下,冬春季在 5 cm 以下,属严重退化的草地。退化草地下垫面土壤主要有盐碱土、草甸土和淡黑钙土。选取退化草地与农田作对比,可以比较不同土地利用中农业对地气间水和能量交换过程的影响^[12]。

辐射测量分向上、向下的长、短波测量,仪器安装于 2.0 m 高度上。测量 5 cm 及 10 cm 处的土壤热通量。湍流观测仪器由超声风速温度仪(CSAT3)、湿度和 CO₂ 脉动仪(LI-COR,

CS7500) 组成, 测量动量、热量、水汽及 CO_2 湍流通量。湍流仪器安装于 3.0 m 高度上, 采样频率为 10 Hz。平均场、湍流场及辐射每个样本取样时间长度为 30 min。

除仪器出现故障, 仪器检修, 或因天气、供电等原因出现的缺测外, 观测几乎一直连续进行, 目前已经连续运行两年多, 总有效资料长度达到全年的 75% 以上。

2.2 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC 模型^[13]的最初目的是研究区域或全球的气候、干扰、生物地球化学循环等要素的相互作用, 因此, 在设计上它强调了下列基本原则: 1) 在全球范围内, 模型所需要的驱动变量易于取得或已有全球数据集; 2) 模型所需要的生理生态参数已有公认的值或在田间易于测量, 从而各类植被类型对应的参数值可以综合大量的田间测量结果得到。在此基础上, 该模型考虑了碳、水和能量在生态系统中输送通量的计算方法。对于碳的生物量积累, 采用光合酶促反应机理模型计算出每天的初级生产力 GPP, 把生长呼吸和维持呼吸减去后的产物分配给叶、枝条、干和根, 其中考虑了叶和细根的生物气候特征。生物体的碳每天都有一定的比例通过凋落进入枯枝落叶碳库, 特别考虑了大型凋落物(由于整株树木的死亡)的比例。该模型模拟的水循环过程包括降雨、降雪、冠层截留、穿透降水、树干径流、冠层蒸发、融雪、雪的升华、冠层蒸腾、土壤蒸发、蒸散、地表径流、土壤水分的变化及植物对水分的利用。对于土壤过程, 模型考虑了凋落物分解进入土壤有机碳库过程、土壤有机物矿化过程和基于木桶模型的水在土壤层间的输送关系。对于能量过程, 该模型还考虑的过程包括净辐射、感热通量、潜热通量(基于 Penman-Monteith 方程)。此外, 该模型考虑了雪的融化和干扰(类似于 MAPPS 模型)的效应。由于这个模型对生态系统基本过程进行了较全面的考虑, 后来许多模型都采用了类似的建模方法。

本文所用 BIOME-BGC 模型 4.1.1 版本, 包括了模型源程序和使用手册^[14, 15]。

2.3 BIOME-BGC 模型的气象输入和参数

通过 MT-CLIM (山地气候模拟器, 版本 4.3) 模拟得到模拟时段内完整的气象数据(逐日

最高温、最低温、降水、水汽压亏缺^[16]和短波辐射), 作为 BIOME-BGC 的气象输入。

MT-CLIM 模型使用甲站(基准点)日最高温、最低温和降水, 可估算乙站(站点)的温度、降水、辐射和湿度。基准点和站点可位于不同的高度, 及不同的坡度和坡向。当基准点和站点相对靠近时可获得较好的结果(如位于同一个山谷的顶部和底部)^[17]。

BIOME-BGC 模型把 34 个参数分为几类: 转换和死亡(Turnover and mortality)^[18]; 分配(Allocation); 植物不稳定成分、纤维素、木质素部分; 碳氮比; 叶中核酮糖 1, 5-二磷酸加氧羧化酶中 N 含量(Fraction of leaf nitrogen in Rubisco, FLNR); 比叶面积(SLA)^[19~23]; 叶片传导系数; 树冠对水的截取和光的逃逸; 水汽压亏缺(Vapor pressure deficit)和叶片水对传导的潜在控制^[24]。这些详细的参数使 BIOME-BGC 可以利用气象信息和研究地点条件(土壤^[25]、海拔等^[26~28]), 能在 1 m^2 到全球范围尺度上对主要生物群区的碳、水和氮每天的通量和状态进行模拟。本模拟中, 取起始年最大叶碳为 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 初始土壤水饱和率为 70%; 土壤矿质氮为 $0.000 25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (N)^[29]; 土壤有机质库中: 微生物快速、中速、慢速和惰性碳库分别取为 0.06 、 0.18 、 3.66 和 $2.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ (C)(详见文献[29]和[30])。

3 模拟结果与分析

3.1 草地潜热通量分析

在所模拟时段内, 通榆草地的观测值和模拟值都显示夏季潜热通量明显大于冬季。草地潜热通量模拟值总体上略大于其实测值, 但主要趋势比较吻合。由观测值知, 草地在观测期内的总降雨量为 379.8 mm, 年蒸散量(ET)的模拟值为 379.2 mm, 产流为 0。

决定自然蒸发量的因素有温度、降水等气象要素, 一般认为, 若假设其他条件没有太大的变化, 气温升高将导致区域潜在蒸发增加^[32]。从图 1a 和图 2a 可以看出, 随着天气转暖, 气温回升, 潜热通量也有增大的趋势。

7、8 月潜热通量模拟值比观测值略大, 可能

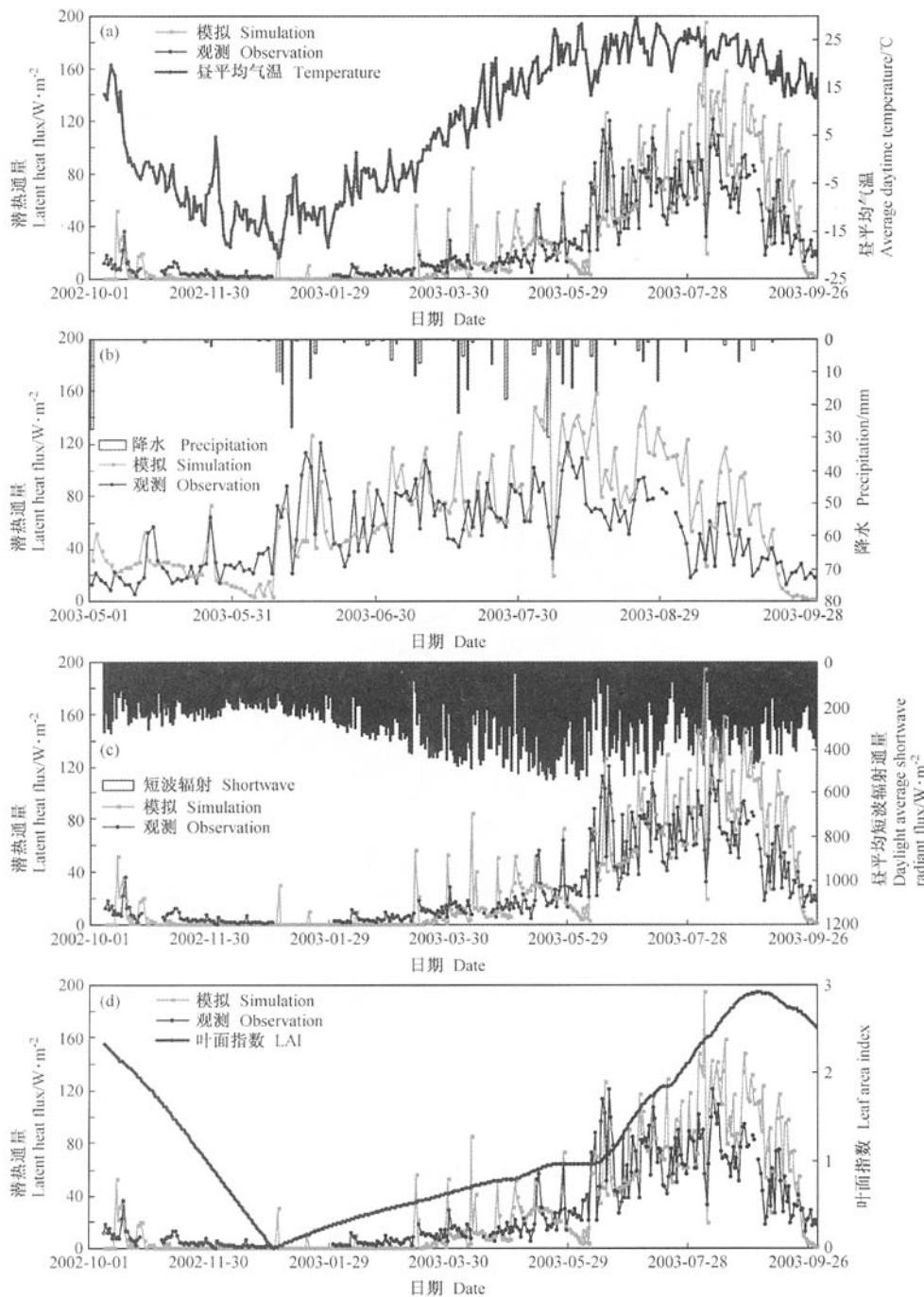


图1 草地潜热通量模拟与观测比较：(a) 昼平均气温；(b) 降水；(c) 昼平均短波辐射通量；(d) 叶面指数
Fig.1 Comparison of simulations and observations of grassland latent heat with (a) average daytime temperature, (b) daily precipitation, (c) daylight average shortwave radiant, and (d) leaf area index

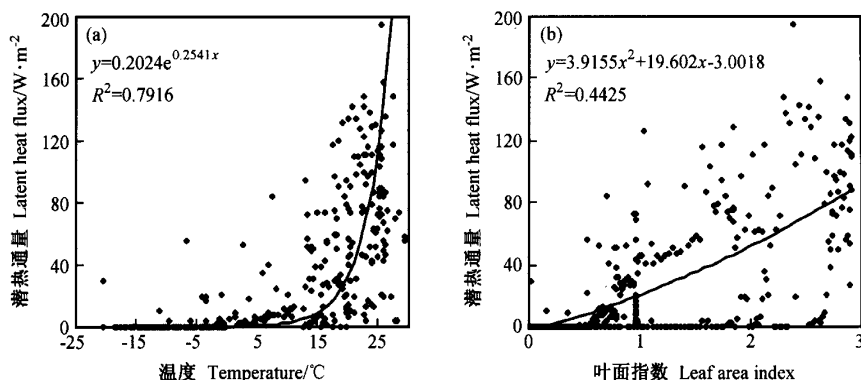


图2 草地潜热通量模拟值与昼平均温度 (a) 和叶面指数 (b) 的相关分析

Fig. 2 Correlation analysis between the simulated latent heat flux of grassland and average daytime temperature (a) and leaf area index (b)

是由于此时通榆进入了雨季。降水对通量的观测产生了一定的影响。由于降雪没有观测，故图 1b 只给出 2003 年 5~9 月的降水与潜热通量的关系，可以看出降水量较多时潜热通量也较大。

决定自然蒸发量的因素，不仅有温度、降水、短波辐射通量等气象要素，而且还有下垫面性质，如地形、植被、土壤性质等。短波辐射也会影响土壤蒸发和植物蒸腾（见图 1c）。植物蒸腾受叶面生理作用控制，受大气的蒸发能力、土壤水分和植物气孔调节作用的影响^[33]。叶面指数（见图 1d）首先影响地表覆盖度，其次影响冠层蒸腾表面积，再次是影响冠层的通风状况^[34]。由图 2b 可以看出，当叶面指数较小时，地表的覆盖率低，若土壤湿润，地表蒸发大；而土壤表层变干后，蒸发变得很小，总蒸散量也小。当叶面指数较大时，蒸散中蒸腾占主要部分，根系吸水范围广，在一定的土壤含水量范围内，蒸腾不受水分限制。随叶面指数的进一步增大，蒸散量逐渐逼近一稳定值。

Hirai 等^[35]用 OP-SiB 改进土壤亚模型和雪亚模型后的 NEW-SiB 模型模拟 CAMP 计划中蒙古草草地地表净辐射，证明改进后的模型能更好地模拟欧亚草地的地表热平衡。

3.2 农田潜热通量分析

在所模拟时段内，通榆农田的观测值和模拟值都显示夏季潜热通量明显大于冬季（图 3）。农田的生长季为每年的 5~10 月，可见在生长季潜热的模拟值和观测值是比较接近的。由观测值知，

农田在观测期内的总降水量为 349.4 mm，年蒸散量（ET）的模拟值为 349.3 mm，产流为 0 mm。

蒸发量模拟值与温度的相关系数为 0.686，说明两者间存在一定的正相关关系（见图 4a）；但有一些蒸发量表现为极值情况，但温度却不是这段时间内的最高值（如 2003 年 7 月 7 日，见图 3a）；主要原因可能是此日内短波辐射很强且叶面指数与前日比有了较大增长，因为在农田中其他条件相同时，农田作物群体吸收的太阳辐射能越多（见图 3c），可能耗去的水分就越多^[31]。

降水量与蒸发量的关系一般为蒸发稍微滞后，可以解释为：经过前期降水，有较多的水量可供蒸发，因此蒸发量有了明显增加。例如 2003 年 6 月 10 日前后，是降水较多的日子，随后几天蒸发量显著增加；而 2003 年 7 月 11~17 日一直未降水，蒸发量在这期间逐渐减少（见图 3b）。在农田中此类现象较之草地更为明显。7、8 月雨季蒸发量的一个极低值出现在 8 月 6 日，查看此日的气象资料发现，前日（8 月 5 日）有降雨，且气温由 5 日的 26℃ 降到了 19℃，冠层的蒸发减少了很多，因而蒸散量有了很大的减弱。

植被条件对蒸发量的影响也可能很强，因为叶面积指数与蒸发的相关系数为 0.888（见图 4b），当然叶面指数与温度本来也具有很好的相关系数，但是，模拟和观测都发现，在温度条件相同或相近时，叶面指数大的蒸发大，如 2003 年 5 月 10 日和 7 月 19 日的昼平均气温都是 18.3℃，但叶面指数分别为 0.19 和 2.1，蒸发量却分别为

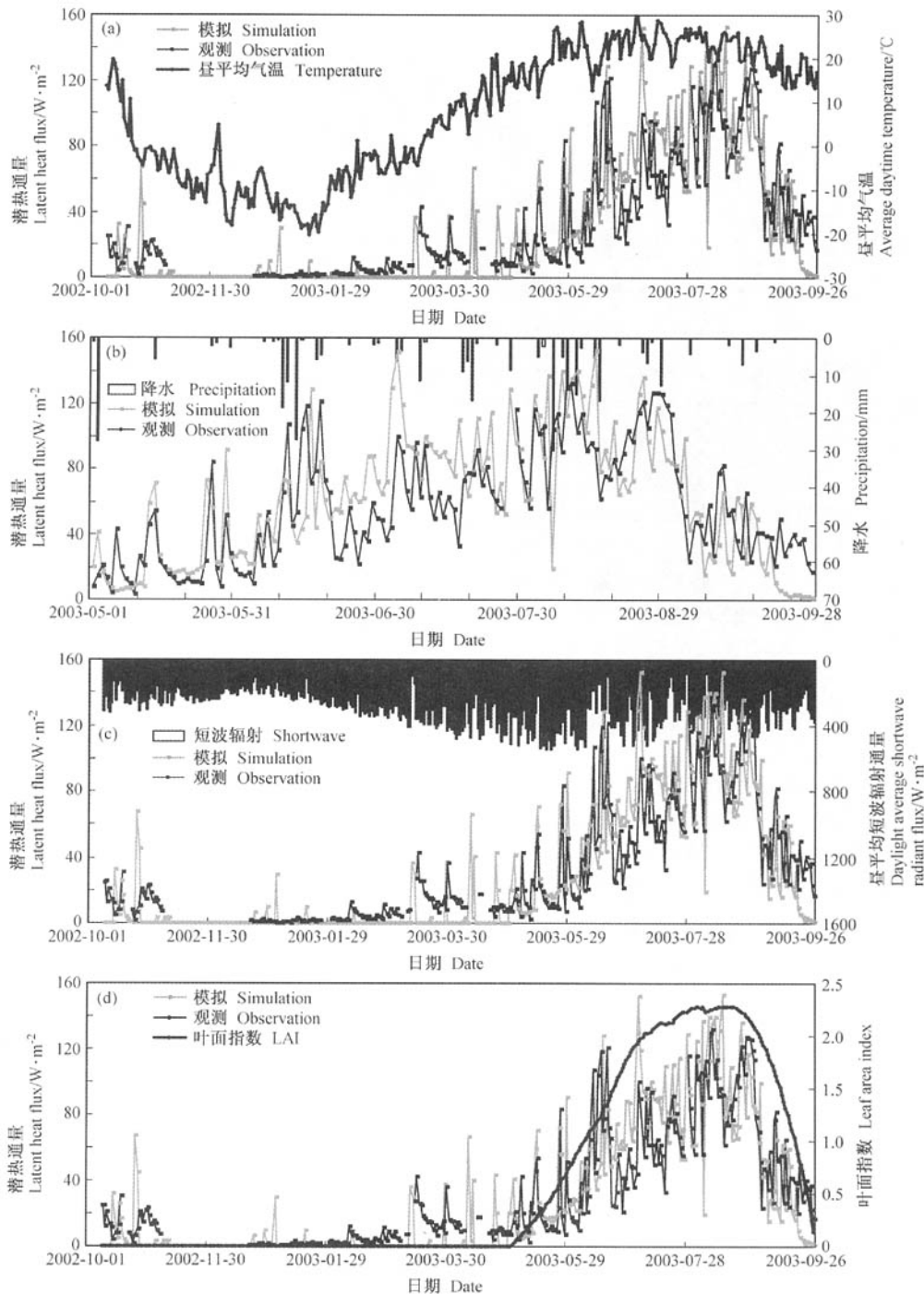


图 3 农田潜热通量模拟与观测比较, 其余同图 1
Fig. 3 As in Fig. 1, but comparison of farmland

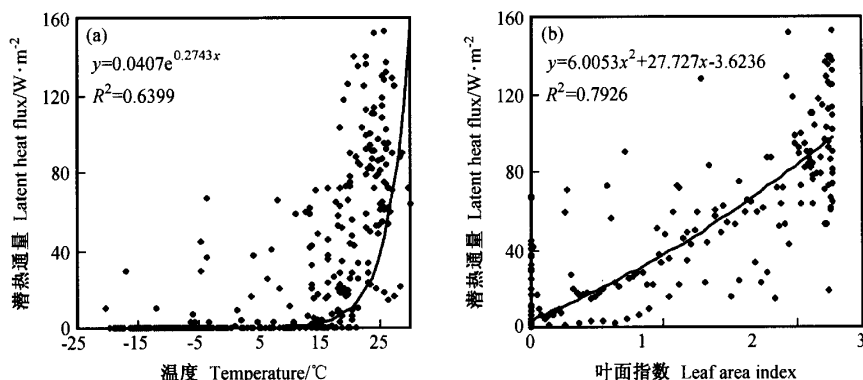


图4 农田潜热通量模拟值与昼平均温度 (a) 和叶面指数 (b) 的相关分析

Fig. 4 Correlation analysis between the simulated latent heat flux of farmland and average daytime temperature (a) and leaf area index (b)

$8.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $63.18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相差了 7.8 倍 (见图 3d)。

Yang^[36] 用改进水文学方案的陆面过程模式 (HELP) 模拟了 2001 年 7 月 2 日~10 月 1 日泰国木薯地的潜热通量, 发现模拟值和观测值趋势基本一致, 模拟值比 CEOP 观测值略小。

Lu 和 Mitchell^[37] 对 NCEP 全球预测系统 (GFS) 的陆面模型进行了改进, 将土壤由原来的 2 层增加到了 4 层, 并模拟了美国南方大平原 (South Great Plains) 的潜热通量, 其值比 CEOP 观测值略低; 模拟的美国蒙大纳派克堡 (Ft. Peck, MT.) 的潜热通量则比观测值高出很多。因此说明了 CEOP 基准站观测值对评价 NCEP 全球预测系统陆面过程模拟的重要性。

4 小结

本文用 BIOME-BGC 模型模拟了 2002 年 10 月~2003 年 9 月半干旱地区吉林通榆草地和农田生态系统的潜热通量, 得到的通量模拟值与通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测站的观测值基本一致。

(1) 在模拟时段内, 通榆草地、农田潜热通量的夏季观测值和模拟值都明显大于冬季。

(2) 本文研究了蒸发与植被的关系, 植物蒸腾受叶面生理作用控制, 受大气的蒸发能力、土壤水分和植物气孔调节作用的影响。叶面积影响地表覆盖度、冠层蒸腾表面积和冠层的通风状况。叶面指数较小时, 地表的覆盖率低, 若土壤湿润,

地表蒸发大; 而土壤表层变干后, 蒸发变得很小, 总蒸散量也小。当叶面指数较大时, 蒸散中蒸腾占主要部分, 根系吸水范围广, 在一定的土壤含水量范围内, 蒸腾不受水分限制。随叶面指数的进一步增大, 蒸散量逐渐逼近一稳定值。

(3) 在其他条件没有太大变化的情况下, 随着温度升高和短波辐射通量增强潜热通量增大。

(4) 潜热通量对降水表现出一定的滞后性, 可以解释为: 经过前期降水, 有较多的水量可供蒸发, 因此蒸发量有了明显增加。在农田中此类现象较之草地更为明显。

(5) CEOP 的观测数据对模型的验证和改进具有重要意义。半干旱区水资源的合理利用更要引起当地政府和群众的重视。

参考文献 (References)

- [1] 马兴旺, 李保国, 程远. 干旱区水土资源时空变化的定量研究. 干旱区地理, 2002, **25** (2): 109~114
Ma Xingwang, Li Baoguo, Cheng Yuan. Quantitative research on the temporal and spatial change of water and land resources. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2002, **25** (2): 109~114
- [2] 黄妙芬. 地表通量研究进展. 干旱区地理, 2003, **26** (2): 159~165
Huang Miaofen. Advance of research on surface flux. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2003, **26** (2): 159~165
- [3] 季劲钧, 刘青, 李银鹏. 半干旱地区地表水平衡的特征和模拟. 地理学报, 2004, **59** (6): 964~971
Ji Jinjun, Liu Qing, Li Yinpeng. Features and simulation of surface water balance in semi-arid areas. *Acta Geograph-*

- ica Sinica (in Chinese), 2004, **59** (6): 964~971
- [4] 李凤全. 半干旱区农业生态环境质量演化过程研究——以吉林省通榆县为例. 农业环境与发展, 2003, **4**: 36~38
Li Fengquan. Researches on the processes of environmental quality evolvement of agricultural ecology—Take Tongyu, Jilin Province for example. *Agricultural Environment and Development* (in Chinese), 2003, **4**: 36~38
- [5] 张柏文, 郭传新, 耿春梅, 等. 吉林省水资源生态问题初步探索. 世界地质, 2004, **23** (2): 149~152
Zhang Baiwen, Guo Chuanxin, Geng Chunmei, et al. Attentive exploration on ecological issues of water resources of Jilin Province. *Global Geology* (in Chinese), 2004, **23** (2): 149~152
- [6] 于明荣. 吉林省中西部平原灌区主要环境问题及保护对策研究. 水电站设计, 2001, **17** (4): 33~36
Yu Mingrong. Researches on main environmental problems and protection in irrigated plain area of middle and west part of Jilin Province. *Water Electricity Plant Design* (in Chinese), 2001, **17** (4): 33~36
- [7] 安刚, 孙力, 廉毅. 东北地区可利用降水资源的初步分析. 气候与环境研究, 2005, **10** (3): 132~139
An Gang, Sun Li, Lian Yi. A Primary Analysis of Utilizable Precipitation in Northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 132~139
- [8] 廉毅, 安刚, 王琪, 等. 吉林省 40 年来气温和降水的变化. 应用气象学报, 1997, **8** (2): 197~204
Lian Yi, An Gang, Wang Qi, et al. Variations of temperature and precipitation during the last forty years in Jilin Province. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8** (2): 197~204
- [9] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法的对比研究. 自然资源学报, 2003, **18** (2): 161~167
Liu Shaomin, Sun Zhongping, Li Xiaowen, et al. A comparative study on models for estimating evapotranspiration. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2003, **18** (2): 161~167
- [10] 符淙斌, 温刚. 中国北方干旱化的几个问题. 气候与环境研究, 2002, **7** (1): 22~291
Fu Congbin, Wen Gang. Several issues on aridification in the Northern China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (1): 22~291
- [11] Bosilovich M G, Lawford R. Coordinated Enhanced Observation Period (CEOP) international workshop. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83** (10): 1495~1499
- [12] 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
- [13] Hunt R E, Running S W. Simulated dry matter yields for aspen and spruce stands in the North American boreal forest. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1992, **18** (3): 126~133
- [14] <http://gcmd.nasa.gov/records/Biome-BGC.html>
- [15] http://www.nts.gov/umt.edu/models/bgc/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=27
- [16] Kimball J S, Running S W, Nemani R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, **85**: 87~98
- [17] <http://www.nts.gov/umt.edu/bioclimate/mtclim/>
- [18] Corbeels Marc. Plant litter and decomposition: General concepts and model approaches, NEE Workshop Proceedings, 2001. 18~20
- [19] 王润元, 张强, 杨兴国, 等. 河西东部绿洲农作物生物量变化特征初探. 高原气象, 2003, **23** (2): 276~279
Wang Runyuan, Zhang Qiang, Yang Xingguo, et al. Change characteristics of corn biomass at oasis in east part of Hexi Corridor region. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **23** (2): 276~279
- [20] 张烈, 戴俊英, 刘江, 等. 有效微生物群对玉米植株生长与代谢的影响. 农业现代化研究, 1999, **20** (6): 355~358
Zhang Lie, Dai Junying, Liu Jiang, et al. Effect of effective micro-organisms on growth and metabolism of maize plants. *Research of Agricultural Modernization* (in Chinese), 1999, **20** (6): 355~358
- [21] 张美善, 徐克章. S3307 浸种对玉米幼苗生长及抗逆性的影响. 玉米科学, 2003, **11** (4): 72~73, 85
Zhang Meishan, Xu Kezhang. Effects of seed soaking in S3307 solution on growth and stress resistance of maize seedlings. *Journal of Maize Science* (in Chinese), 2003, **11** (4): 72~73, 85
- [22] 刘建栋, 李世奎, 于强, 等. 水分胁迫对黄淮海夏玉米农业气候资源利用的影响——水分胁迫对叶片生产力影响. 资源科学, 2002, **24** (1): 51~54
Liu Jiandong, Li Shikun, Yu Qiang, et al. Impacts of water stress on agroclimatic resource of summer maize in Huanghuaihai Plain of China: Impact of water stress on the leaf productivity. *Resources Science* (in Chinese), 2002, **24** (1): 51~54
- [23] 刘建栋, 于强, 闵庆文, 等. 水分胁迫对黄淮海夏玉米农业气候资源利用的影响——II. 水分胁迫对区域生产力影响. 资源科学, 2002, **24** (3): 92~95
Liu Jiandong, Yu Qiang, Min Qingwen, et al. Impacts of water stress on agroclimatic resources of summer maize in Huanghuaihai Plain of China: Impact on regional produc-

- tivity. *Resources Science* (in Chinese), 2002, **24** (3): 92~95
- [24] 苏宏新, 桑卫国. 宏观植物生态模型的研究现状与展望. *植物生态学报*, 2002, **26**: 98~106
- Su Hongxin, Sang Weiguo. Review on the current state and future development of the macro-scale plant ecological models. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2002, **26**: 98~106
- [25] Amthor J S, Chen J M, Clein J S, et al. Boreal forest CO₂ exchange and evapotranspiration predicted by nine ecosystem process models: Intermodel comparisons and relationships to field measurements. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106** (D24): 33623~33648
- [26] 李玉中, 祝廷成, 姜世成. 羊草草原生态系统干湿沉降氮输入量的动态变化. *中国草地*, 2000, **2**: 24~27
- Li Yuzhong, Zhu Tingcheng, Jiang Shicheng. Nitrogen deposition in leymus chinensis grassland of Songnen Plain. *Grassland of China* (in Chinese), 2000, **2**: 24~27
- [27] 蔡福, 祝青林, 何洪林, 等. 中国月平均地表反照率的估算及其时空分布. *资源科学*, 2005, **27** (1): 114~119
- Cai Fu, Zhu Qinglin, He Honglin, et al. Estimation and spatio-temporal distribution of monthly mean surface albedo in China. *Resources Science* (in Chinese), 2005, **27** (1): 114~119
- [28] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 2001
- [29] <http://www.nrel.colostate.edu/projects/century5/reference/index.htm>
- [30] Raymond H E Jr, Piper Stephen C, Nemani R, et al. Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO₂ concentrations predicted by an ecosystem process model and three-dimensional atmospheric transport model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (3): 431~456
- [31] 候晓. 估算自然蒸发的一种方法. *气象*, 1977, **6**: 26
- Hou Xiao. A method for estimating spontaneous evaporation. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1977, **6**: 26
- [32] 沈大军, 刘昌明. 水文水资源系统对气候变化的响应. *地理研究*, 1998, **17** (4): 435~446
- Shen Dajun, Liu Changming. Hydrological and water resources responses to climatic change—A review. *Geographical Research* (in Chinese), 1998, **17** (4): 435~446
- [33] 斯迪. 农作物耗水量与天气气候条件. *云南农业*, 1998, **4**: 30
- Si Di. Amount of consumed water of crop and climate condition. *Yunnan Agriculture* (in Chinese), 1998, **4**: 30
- [34] 莫兴国. 土壤—植被—大气系统水分能量传输模拟和验证. *气象学报*, 1998, **56** (3): 323~332
- Mo Xingguo. Modeling and validating water and energy transfer in soil-vegetation-atmosphere system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, **56** (3): 323~332
- [35] Hirai M, Sakashita T, Matsumura T. Evaluation of a new land surface model for JMA-GSM-using CEOP EOP-3 reference site dataset. CEOP Phase 1 Achievements-Presentations at CEOP/IGWCO Joint Meeting, 2005, Tokyo
- [36] Yang Dawen. Hydrological improvement of the land surface process scheme using the CEOP observation. CEOP Phase 1 Achievements-Presentations at CEOP/IGWCO Joint Meeting, 2005, Tokyo
- [37] Lu C H, Mitchell K. Land surface processes simulated in the NCEP global model: A comparative study using the CEOP reference site observations. CEOP Phase 1 Achievements-Presentations at CEOP/IGWCO Joint Meeting, 2005, Tokyo