

华北平原冬小麦生长期典型农田热、碳通量特征与过程模拟

袁再健^{1,2}, 沈彦俊^{1*}, 褚英敏³, 齐永青¹

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021; 2. 河北科技大学经济管理学院, 石家庄 050018; 3. 河北经贸大学旅游学院, 石家庄 050061)

摘要:以位山试验站典型农田为对象, 利用位山站 2005-10-10~2006-06-10 日的实验观测数据, 探讨了冬小麦整个生长期农田的热、碳通量特征, 并运用 SiB2(simple biosphere model Version2)模型对热、碳通量进行了模拟分析, 结果表明, 农田的热、碳通量在冬小麦生长过程中表现出明显的日变化, 这些通量的最大值基本出现在正午前后; 热、碳通量的日际变化也较明显, 其中净辐射与潜热通量在冬小麦不同生长期表现为: 越冬期< 拔节抽穗期< 灌浆成熟期; 感热通量表现为: 拔节抽穗期< 灌浆成熟期< 越冬期; 而 CO₂ 通量为: 越冬期< 灌浆成熟期< 拔节抽穗期. 对以上通量及地表温度的模拟表明, SiB2 模型能较好地模拟冬小麦生长期中农田热、碳通量及地表温度, 净辐射、潜热通量、感热通量、CO₂ 通量与地表温度的模拟值与观测值的一致性较好, 线性相关系数 R² 分别达 0.985、0.637、0.481、0.725、0.499 与 0.877, 其中感热通量与 CO₂ 通量模拟偏差较大. 另外, 按冬小麦生长期分阶段对农田以上分量模拟结果表明, SiB2 模型在冬小麦拔节抽穗期模拟效果最好, 并发现模型对叶面积指数敏感.

关键词: 华北平原; 冬小麦; 热、碳通量; SiB2; 模拟

中图分类号: X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2010)01-0044-08

Characteristics and Simulation of Heat and CO₂ Fluxes over a Typical Cropland During the Winter Wheat Growing in the North China Plain

YUAN Zai-jian^{1,2}, SHEN Yan-jun¹, CHU Ying-min³, QI Yong-qing¹

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy Sciences, Shijiazhuang 050021, China; 2. School of Economics & Management, Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China; 3. College of Tourism, Hebei University of Economics & Business, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: In order to study the surface energy budget of the cropland in North China Plain, this paper discussed the characteristics of heat and CO₂ fluxes of the cropland during the winter wheat growing, and then simulated the dynamic change of the flux of heat and carbon by SiB2(simple biosphere model Version2) based on the observational data from 2005-10-10 to 2006-06-10 of Weishan experimental station. The results showed that the heat and CO₂ fluxes put up obvious inter-daily variations in the course of the wheat growing and their maximum appeared at around midday. The diurnal variations of them are obvious too, and the net radiation, latent heat flux and the heat flux of underlaying surface during the winter were minimum while they were maximum in the anthesis and maturation of wheat; and the sensible heat flux during the winter was maximum and it was minimum in the shooting and heading period of wheat; while the CO₂ flux during the shooting and heading period of wheat was the maximum and it was minimum during the winter. Finally, SiB2 model was used to simulate the heat and CO₂ fluxes and the surface temperature based on the data of Weishan observation station and the results showed that the model was good at simulating, the simulated net radiation, latent heat flux, sensible heat flux, the heat flux of underlaying surface, CO₂ flux and surface temperature were shown to be basically in agreement with observations with their square of related coefficient being 0.985, 0.637, 0.481, 0.725, 0.499 and 0.877 respectively. In addition, the average simulated value of net radiation, latent heat flux and the heat flux of underlaying surface were lower than the observed value and others were higher than the observed ones. In addition, the fluxes and surface temperature were simulated by SiB2 in the different stages of winter wheat and the results showed that the accuracy of the model in the shooting and heading period of wheat was better than the other two stages and the leaf area index was sensitive to the model.

Key words: North China Plain; winter wheat; heat and CO₂ fluxes; SiB2(simple biosphere model Version2); simulate

陆面过程是指发生在地表面与大气之间水分、热量和动量交换的过程, 包括地面上的热力过程、水文过程和生物过程, 地表面与大气间的能量和物质交换, 以及地面以下土壤中的热传导和水热输送过程等. 陆面过程会引起由局地到全球不同尺度的大

气环流和气候变化. 而大气运动的改变, 又反过来影

收稿日期: 2009-03-07; 修订日期: 2009-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871021); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX1-YW-08-03-07)

作者简介: 袁再健(1976-), 男, 副教授, 主要研究方向为 GIS、水土保持、生态水文与地理过程模拟, E-mail: selfsurpass@163.com

*通讯联系人: E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

响陆面的特性^[1,2]. 农田生态系统是陆地生态系统的一个重要组成部分, 随着全球气候变化和水资源的日益匮乏、节水农业的发展, 农田生态系统对环境变化的响应以及农田碳源/汇对气候变化的贡献量成为科学家们关注的热点. 近年来, 国内外关于下垫面的水、热、碳特征研究较多, 例如, McGinn 等^[3]、Baldocchi^[4]、Soegaard 等^[5]、Suyker 等^[6]对不同作物类型冠层 CO_2 通量进行了比较研究, Steduto 等^[7-10]则对同种作物(玉米)不同水分处理进行了比较分析; 1996 年日本稻田试验测量稻田冠层上能量成分的组成, 能量能在 5% 以内闭合^[11]; 高志球等^[12]将大气强迫变量代入 SiB2 模拟 GAME/Tibet (GEWEX 亚洲季风试验/青藏高原试验) 那曲近地层观测站地表能量收支, 模拟效果较好; 高志球等^[13]对常熟地区水稻不同生长期的能量收支进行了研究; 李新等^[14]使用 GAME-Tibet 实验中的土壤水分观测值进行单点数值实验, 成功地将土壤水分观测同化到陆面过程模型 SiB2 中; 汪瑛^[15]应用 SiB2 模型分别对稻田分蘖期、抽穗期、拔节期及旱地进行了模拟, 总体效果较好; 秦钟^[16]研究了华北平原农田水热、 CO_2 通量; 黄春林等^[17]利用 1998-07-06~1998-08-09 青藏高原 GAME-Tibet 试验区 MS3608 站点的 4 cm、20 cm 和 100 cm 的土壤水分观测数据同化 SiB2 模型输出的表层、根区和深层土壤水分, 探讨了一个基于集合卡尔曼滤波和简单生物圈模型的单点土壤水分同化方案. 但是研究最多的下垫面土地利用类型为水稻田与林地, 小麦地相对较少, 并且国内通量观测与模拟对比研究还刚刚开始.

以位山试验站观测数据为基础, 探讨冬小麦不同生长期热、碳通量特征并对通量过程进行模拟, 目的在于比较分析华北平原冬小麦不同生长期能量交换和 CO_2 通量特征, 以期为分析我国典型农田生态系统热、碳通量特征、维护作物生态环境、提高作物产量提供指导.

1 试验概况

位山灌区位于山东聊城市境内, 该区地势平坦, 平均海拔为 30 m, 属暖温带季风气候, 年均降雨量为 580~670 mm, 土壤类型为粉壤土, 该地区 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. 冬小麦品种为劲麦 2022, 生育过程中施氮肥 2~3 次(共 400 kg/hm²左右), 灌溉 2~3 次, 产量在 6 000~7 500

kg/hm²左右.

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. 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法观测系统等; 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: 32D 超声风速温度计(CSA T3, 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; 二氧化碳和水分红外分析仪(LI7500, LI2COR, Inc.), 用于测量空气中的瞬时水汽、 CO_2 浓度. 数据采集频率为 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)及地表温度, 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. 2 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)^[18].

本研究使用的观测数据时间序列为冬小麦整个生长期: 2005-10-10~2006-06-10(共 239 d, 由于仪器故障, 缺测 2006-03-07~2006-03-11 这 5 d 的数据).

2 农田热、碳通量特征

从种子萌发到产生种子, 冬小麦一生要经历发芽、出苗、分蘖、越冬、返青、拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆、成熟等生长发育过程. 根据位山试验站冬小麦(2005~2006 年)生长发育特征, 把冬小麦整个生长期简单划分为越冬期(2005-10-10~2006-03-10, 包括发芽、出苗、分蘖、越冬、返青这几个过程)、拔节抽穗期(2006-03-11~2006-04-25, 包括拔节、孕穗、抽穗 3 个过程)、灌浆成熟期(2006-04-26~2006-06-10, 包括开花、灌浆与成熟 3 个时期)3 个阶段. 下面分别分析冬小麦这 3 阶段及整个生长期农田净辐射、感热通量、潜热通量和 CO_2 通量的特征.

2.1 净辐射

净辐射是下垫面各种热量、动量和水分交换过程的主要能源, 是驱动地气之间热量交换的动力因子. 在农田生态系统中, 从外界获得的能量主要是净辐射能, 用以支出消耗于农田蒸散、空气热交换、加热土壤

以及极少部分储存为光合能. 净辐射(R_n)由观测到的短波辐射与长波辐射计算得到, 计算公式为:

$$R_n = S_u + S_d + L_u + L_d \quad (1)$$

式中, S_u 为向上的短波辐射(反射辐射, 为负), S_d 为向下的短波辐射(总辐射, 为正), L_u 为向上的长波辐射(地面长波辐射, 为负), L_d 为向下的长波辐射(大气逆辐射, 为正).

冬小麦农田表明能量平衡方程还可描述为:

$$R_n = \lambda E + H + U + M \quad (2)$$

式中, R_n 是净辐射, λE 和 H 分别是潜热和感热通量, U 是下垫面热储存, 它等于土壤热存储与冠层

热存储之和, M 是光合作用呼吸耗能. Harazono 等^[11]指出 M 不足 R_n 的 1%, 因而可忽略.

在本研究时间序列内, 中午前后净辐射的最大值达到 $724.56 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 净辐射的 239 d 平均值为 $56.33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 随着冬小麦冠层的增高和植被密度的增加, 净辐射通量有所增加. 图 1 是冬小麦生长期内农田能量通量(包括净辐射、潜热通量、感热通量)日变化曲线. 从中可以看出在冬小麦生长期内农田净辐射存在明显的日变化, 在中午前后达到 1 d 中的最大值, 然后开始减少, 在太阳落山后的 18:00 以后时变化曲线趋于平缓, 夜间净辐射基本为负值.

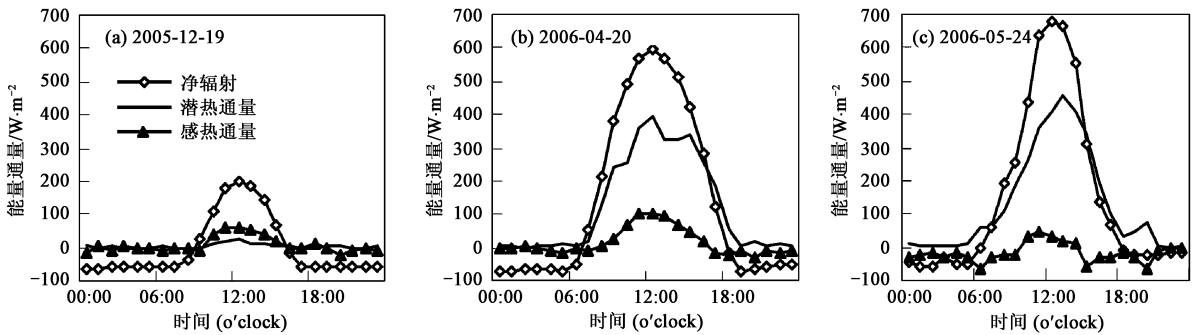


图 1 农田能量通量的典型日变化过程比较

Fig. 1 Comparison of the process of typical daily energy fluxes change of farmland

从冬小麦整个生长期农田净辐射的逐日变化曲线(图 2)可以看出, 净辐射也存在明显的日际变化, 2006 年 3 月后净辐射明显增加, 冬小麦不同生长期农田的净辐射值不一样, 主要是由冬小麦各生长期太阳辐射的日际变化引起的, 各生长期的辐射特征如下.

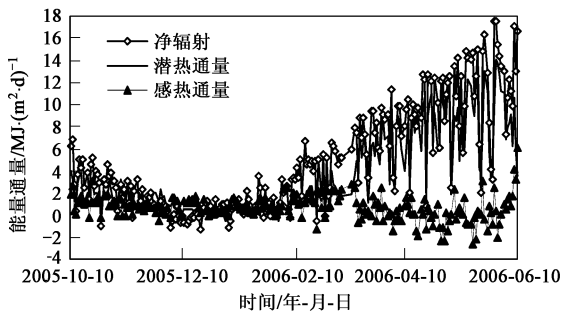


图 2 农田能量通量日际变化曲线

Fig. 2 Inter-day change of energy fluxes of the farmland

(1) 越冬期 农田净辐射的值是冬小麦 3 个时期中最小的, 日最大净辐射值为 $7.89 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均值为 $1.98 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

(2) 拔节抽穗期 净辐射比越冬期增加很多, 平

均日净辐射为 $8.76 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

(3) 灌浆成熟期 净辐射继续增加, 平均日净辐射达 $12.11 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

2.2 潜热通量

陆面主要是通过感热和潜热通量的形式向大气输送能量. 水转化为水汽, 需要耗费大量热能, 因此蒸发也是地-气间热交换的主要因子之一. 水分蒸发需要吸收热量, 水汽凝结会释放热量, 由于水汽的蒸发和凝结而发生的热量转换就是潜热交换. 潜热通量也是地表热量平衡中的一个重要组成部分, 在湿润地区, 潜热通量占净辐射的比例很大. 农田的热量交换过程是一个复杂的过程, 除了土壤、灌溉水和大气参与外, 小麦的生长也影响着热量交换的每个过程. 潜热通量主要包含了两部分: 小麦的蒸腾和地面的蒸发. 不管是蒸腾和蒸发过程, 都是热量的转换完成的. 冬小麦的生长状况和地表的灌溉水量都直接影响着蒸腾和蒸发, 蒸腾量随叶面积指数的增大而增加, 而冠层下土壤表面水分的蒸发量却相反, 一方面是由于小麦覆盖层对太阳辐射的阻挡作用, 另一方面是在稠密的植株间风速很小, 水汽不易扩散, 在一定程度上抑制了水面的蒸发; 空气湿度对蒸发

的影响是一个十分重要的因子, 农田的灌溉水和植被对湿度和蒸发的影响都很大. 农田的蒸腾和蒸发日际变化很大, 随冬小麦的生长发育有上升的趋势, 因此潜热通量也有这样的趋势. 从冬小麦潜热通量日变化(图 1)可以看出, 冬小麦整个生长期中农田潜热通量有明显的日变化, 与其它通量一样, 在中午最大(此时, 净辐射最大), 夜间最小. 从图 2 可以看出, 整个冬小麦生长期农田潜热通量也存在明显的日际变化, 2006 年 3 月中旬后潜热通量明显增加, 冬小麦各生长期农田的潜热通量特征如下.

(1)越冬期 这个时期农田的潜热通量比较小, 原因是这时期的净辐射小, 气温低不利于农田水分的蒸发, 小麦冠层还没有形成不利于蒸腾, 因此潜热通量很小; 农田日最大潜热通量为 $4.82 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均值为 $1.24 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

(2)拔节抽穗期 这时的冬小麦已经拔节, 对农田的覆盖变大, 气温也有所升高. 因为净辐射增大, 遵循着能量平衡的规律, 潜热通量比越冬期增大很多; 冠层还没有完全覆盖整个农田, 一部分太阳辐射还可以直接到达地面, 植被的蒸腾和灌溉水的蒸发都对潜热通量起作用. 这段时间潜热通量日最大值为 $12.25 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均日潜热通量为 $7.17 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

(3)灌浆成熟期 这个时期初的冬小麦已十分茂盛, 几乎覆盖了整个农田, 这时期小麦的蒸腾作用最大, 对潜热通量的贡献比前 2 个时期都多, 因为太阳辐射被冠层阻挡, 到达地面的很少, 地表蒸发的作用很小, 所以, 虽然植被蒸腾和土壤蒸发是潜热通量的 2 个组成部分, 但是在冬小麦的不同生长期, 它们所起的作用却不一样. 越冬期地表蒸发对潜热通量起主要作用, 到了返青拔节期, 植被的蒸腾和地表蒸发对潜热通量都有贡献, 而到了抽穗灌浆期, 植被的蒸腾作用占据了主导作用. 潜热通量继续增加, 平均潜热通量为 $8.89 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

2.3 感热通量

感热通量的大小表征着地-气间湍流热交换的快慢和大小, 也就是大气的稳定程度. 白天, 地面温度高于大气温度时, 下垫面向大气输送热量, 在午后达到最大; 夜间, 因为存在逆温, 感热通量一般为负值, 而且夜间稳定层不利于湍流的发展, 所以大气向地面输送的通量值也很小. 由图 1 可见感热通量也存在较明显的日变化, 在中午温度最高时达到了最大值, 夜间感热通量多为负值; 3 个时期农田感热通量的日际变化都不太明显, 但后 2 个阶段感热通量的变化相对剧烈. 冬小麦 3 个时期农田感热通量日平均值分别为 0.92 、 0.10 和 $0.49 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

2.4 CO₂ 通量

CO₂ 通量就是指通过某一个参考界面的 CO₂ 的传输速率. 冬小麦的生长过程中每天都在进行光合作用与呼吸作用, 白天由于小麦光合作用大量吸收 CO₂, 农田中由大气获得 CO₂ 补充, 通量为正; 夜间 CO₂ 通量为负, 表示小麦因呼吸作用呼出 CO₂, 这是总的日变化情况. 随着小麦的生长, 小麦叶面积不断增长, 日间光合作用和夜间呼吸作用也不断增大, 这就是 CO₂ 通量不断增大的原因.

从冬小麦生长期农田表面 CO₂ 通量的日变化曲线(图 3)中可以看到 CO₂ 通量表现出明显的日变化, 白天在光合作用最旺盛的 12:00, 达到吸收最大值; 而夜间小麦呼吸作用向大气释放 CO₂. CO₂ 在不同生长季节也有所区别, 整个生长期冬小麦 CO₂ 通量都存在明显的日际变化(见图 4), 2006 年 4 月后 CO₂ 通量明显增加, 冬小麦不同生长期 CO₂ 通量值不一样, 各生长期的 CO₂ 通量特征如下.

(1)越冬期 这个时期 CO₂ 通量最小, 因为这时小麦的叶面积指数较小, 光合作用的强度不大, 这个时期白天最大 CO₂ 通量值为 $2.95 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 平均值仅为 $0.09 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

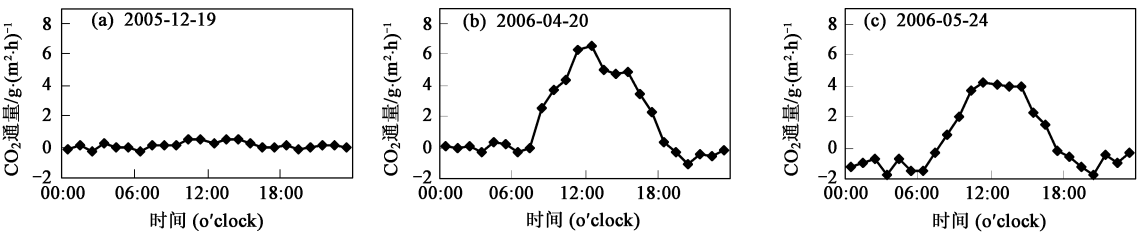


图 3 农田 CO₂ 通量的典型日变化过程比较

Fig. 3 Comparison of the process of typical daily CO₂ flux change of farmland

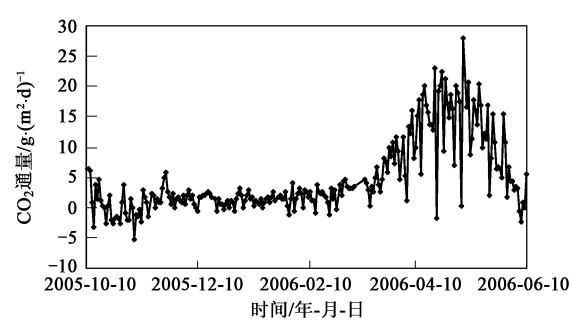


图 4 农田 CO₂ 通量日际变化曲线

Fig. 4 Inter-day change of CO₂ flux of the farmland

(2) 拔节抽穗期 这时期冬小麦的绿叶面积增大很快, CO₂ 通量也随之增大, 白天最大通量值为 7.31 g/(m²·h), 这时期小麦的光合作用使小麦对 CO₂ 吸收和释放都达到顶点, 平均 CO₂ 通量值为 0.90 g/(m²·h)。

(3) 灌浆成熟期 随着冬小麦逐渐成熟, CO₂ 通量开始减少, CO₂ 通量平均值为 0.56 g/(m²·h)。

另外, 经分析发现冬小麦冠层 CO₂ 通量强度与光合有效辐射 PAR(波长为 400~ 700 nm) 有较好的相关关系, 3 个时期的关系以及相关性如下。

越冬期:

$$Q_c = 0.006 \times PAR - 0.108, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.475$$

拔节抽穗期:

$$Q_c = 0.019 \times PAR - 0.435, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.774$$

灌浆成熟期:

$$Q_c = 0.013 \times PAR - 0.633, \text{ 相关系数 } R^2 = 0.646$$

3 农田热、碳通量过程模拟

使用 SiB2 模型对冬小麦生长过程中农田的热、碳通量进行模拟。

3.1 SiB2 模型介绍

Sellers 等^[19~21]对 SiB2 作了详细的描述. 国内王绍强等^[22]、刘树华^[23]与赵少华等^[24]也对其进行了介绍与评述; 卞林根^[25]、高志球等^[12]与汪瑛^[15]应用 SiB2 进行了水、热、碳通量的模拟分析. SiB2 模型所用的控制方程主要有:

$$H = H_c + H_g \quad (3)$$

式中, H 是感热通量, H_c 是冠层部分感热通量, H_g 指裸土地面感热通量。

$$\lambda E = \lambda E_c + \lambda E_{gs} \quad (4)$$

式中, λE 是潜热通量, λE_c 是冠层潜热通量, λE_{gs} 是裸土地表潜热通量。

净辐射计算公式表示为:

$$R_n = R_{nc} + R_{igs} \quad (5)$$

式中, R_n 是净辐射, R_{nc} 是冠层净辐射, R_{igs} 是裸土地表净辐射。

SiB2 模型中的碳通量用下式计算:

$$C = A_c - R_D - R_{soil} \quad (6)$$

式中, C 是 CO₂ 通量, A_c 是光合作用吸收的 CO₂, 方向向下, R_D 是植被呼吸放出的 CO₂, 方向向上, $A_c - R_D$ 是植被部分的净 CO₂ 通量, R_{soil} 是裸土地表 CO₂ 通量, 方向向上。

3.2 通量及地表温度模拟

利用以上位山站农田通量观测数据及流域气候观测资料, 以 1 h 为时间步长, 共 5 736 个时段(239 d), 主要模拟了这段时间能量各分量(主要包括净辐射、潜热通量与感热通量), 同时模拟了 CO₂ 通量与地表温度(见图 5 与图 6)。模拟结果表明, SiB2 模型能够很好较好地模拟农田各能量分量, 对 CO₂ 通量与地表温度的模拟效果也不错, 表 1 为冬小麦整个生长期以上分量模拟平均值与观测平均值对比。

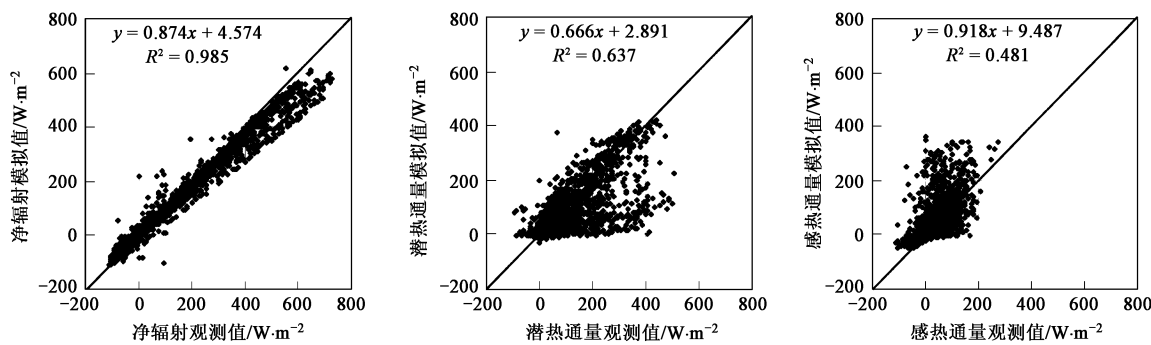


图 5 农田净辐射、潜热通量及感热通量模拟值与观测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and observed values of net radiation, latent heat flux and sensible heat flux of the farmland

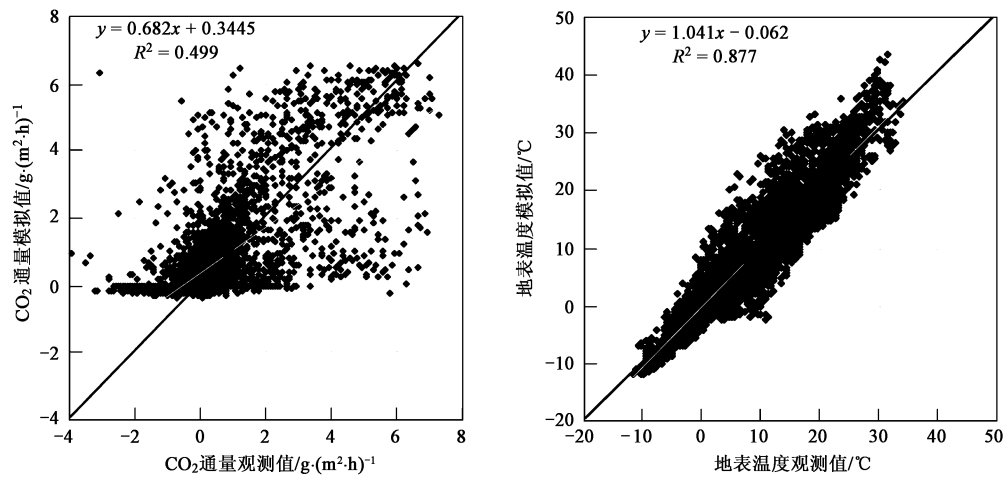


图 6 冬小麦整个生长期农田 CO₂ 通量及地表温度模拟值与观测值对比

Fig. 6 Comparison of simulated and observed values of CO₂ flux and surface temperature of the farmland throughout the growing period of winter wheat

表 1 农田能量通量、CO₂ 通量及地表温度模拟与观测平均值对比

Table 1 Comparison of the average of simulated and observed values of energy flux, CO₂ flux and surface temperature of the farmland

各分量	净辐射/ $W\cdot m^{-2}$	潜热通量/ $W\cdot m^{-2}$	感热通量/ $W\cdot m^{-2}$	CO ₂ 通量/ $g\cdot (m^2\cdot h)^{-1}$	地表温度/ $^{\circ}C$
观测值	56.33	41.80	7.74	0.34	8.30
模拟值	53.81	30.71	16.59	0.58	8.58

另外, 分别按照冬小麦 3 个生长期对农田通量与地表温度进行了模拟分析, 从模拟结果(见表 2)可以看出, 除地表温度外, 其余分量在冬小麦拔节抽穗期模拟效果最佳, 主要原因是此阶段下垫面相对其余两阶段均一, 并且这个阶段冬小麦平均叶面指数最大。

表 2 冬小麦 3 个生长阶段农田能量通量、CO₂ 通量及地表温度模拟与观测对比

Table 2 Comparison of the simulated and observed values of energy flux, CO₂ flux and surface temperature of the farmland in the three growing period of winter wheat

各分量	冬小麦各生长期	线性关系式	相关系数 R^2
净辐射 $W\cdot m^{-2}$	越冬期	$y = 0.918x + 5.390$	0.984
	拔节抽穗期	$y = 0.916x + 6.158$	0.998
	灌浆成熟期	$y = 0.819x + 0.930$	0.985
潜热通量 $W\cdot m^{-2}$	越冬期	$y = 0.831x + 1.864$	0.587
	拔节抽穗期	$y = 0.910x + 5.180$	0.790
	灌浆成熟期	$y = 0.532x + 2.286$	0.507
感热通量 $W\cdot m^{-2}$	越冬期	$y = 0.673x + 1.583$	0.605
	拔节抽穗期	$y = 1.357x + 14.406$	0.743
	灌浆成熟期	$y = 1.181x + 35.924$	0.494
CO ₂ 通量/ $g\cdot (m^2\cdot h)^{-1}$	越冬期	$y = 0.564x + 0.182$	0.278
	拔节抽穗期	$y = 0.926x + 0.688$	0.661
	灌浆成熟期	$y = 0.461x + 0.549$	0.401
地表温度/ $^{\circ}C$	越冬期	$y = 1.112x + 0.115$	0.858
	拔节抽穗期	$y = 1.171x - 1.729$	0.683
	灌浆成熟期	$y = 1.174x - 3.991$	0.808

4 讨论

在冬小麦不同生长期, 农田的净辐射、感热通量、潜热通量与 CO_2 通量表现出了明显的日变化, 其最大值基本上出现在正午前后. 在冬小麦生长过程中, 农田的热、碳通量日际变化也较明显, 农田净辐射及潜热通量在冬小麦各生长期表现为: 越冬期 < 拔节抽穗期 < 灌浆成熟期; 感热通量为: 拔节抽穗期 < 灌浆成熟期 < 越冬期; 冠层 CO_2 通量为: 越冬期 < 灌浆成熟期 < 拔节抽穗期, 并且分析发现冠层 CO_2 通量强度与光合有效辐射有较好的相关性.

SiB2 模型模拟结果表明: 净辐射、潜热通量、感热通量、 CO_2 通量与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^2 分别达 0.985、0.637、0.481、0.725、0.499 与 0.877, 其中净辐射与潜热通量模拟平均值小于观测平均值, 其余几项模拟平均值大于观测平均值, 感热通量与 CO_2 通量模拟偏差较大.

对冬小麦各生长阶段通量与地表温度模拟发现, SiB2 模型在冬小麦拔节抽穗期模拟效果最好, 其原因主要为 SiB2 模型对叶面积指数非常敏感, 这个阶段冬小麦平均叶面指数最大, 并且该阶段下垫面较其它 2 个阶段均一.

本研究 SiB2 模型模拟的时间尺度为小时, 能否用于天或年时间尺度的模拟, 能否把 SiB2 模型从位山试验站推广到整个华北平原以及如何提高模型模拟的精度等问题有待于进一步研究.

5 结论

在冬小麦不同生长期, 农田的能量通量(净辐射、潜热通量与感热通量)及 CO_2 通量表现出明显的日变化与日际变化. 该农田生态系统是大气重要碳汇, 在冬小麦整个生长过程中, 农田碳汇累计达 $1\,112.03\text{ g/m}^2$, 总的来说白天农田系统吸收的 CO_2 大大高于夜间释放的 CO_2 , 在冬小麦 3 生长期中的拔节抽穗期系统吸收 CO_2 最大. 对农田能量、 CO_2 通量及地表温度的模拟表明, SiB2 模型适合于我国华北平原地区农田通量模拟, 模拟精度较高.

参考文献:

[1] 王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/ TIPEX [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 289-294.

[2] 杨兴国, 牛生杰, 郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展 [J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 83-89.

[3] McGinn S M, King K M. Simultaneous measurements of heat, water vapour and CO_2 fluxes above alfalfa and maize [J]. Agric For Meteorol, 1990, 49: 331-349.

[4] Baldocchi D D. A comparative study of mass and energy exchange over a closed C_3 (wheat) and an open C_4 (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange [J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1994, 67: 191-220.

[5] Soegaard H, Jensen N O, Beogh E, et al. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modeling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 114: 153-173.

[6] Suyker A E, Verma S B, Burba G G, et al. Hubbard. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124: 1-13.

[7] Steduto P, Hsiao T C. Maize canopies under two soil water regimes I. Diurnal patterns of energy balance, Carbon dioxide flux, and canopy conductance [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89: 169-184.

[8] Steduto P, Hsiao T C. Maize canopies under two soil water regimes II. Seasonal trends of evapotranspiration, carbon dioxide assimilation and canopy conductance, and as related to leaf area index [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998b, 89: 189-203.

[9] Steduto P, Hsiao T C. Maize canopies under two soil water regimes III. Variation in coupling with the atmosphere and the role of leaf area index [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89: 201-213.

[10] Steduto P, Hsiao T C. Maize canopies under two soil water regimes IV. Validity of the Bowen ratio-energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89: 219-232.

[11] 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.

[12] 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能量收支 [J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 129-141.

[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_2 通量模拟研究 [J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 129-140.

[14] 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.

[15] 汪瑛. 稻田和旱地湍流通量的观测试验与模拟 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2003.

[16] 秦钟. 华北平原农田水热、 CO_2 通量的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 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 Atmosphere Science, 1986, 43(6): 505-531.

[20] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface

- Parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I [J]. Model Formulation Journal of Climate, 1996, 9: 685-703.
- [21] 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, 1996b, 9: 706-737.
- [22] 王绍强, 陈育峰. 陆地表层碳循环模型研究及其趋势 [J]. 地理科学进展, 1998, 17(4): 64-72.
- [23] 刘树华. 环境物理学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 305-310.
- [24] 赵少华, 邱国玉, 杨永辉, 等. 遥感水文耦合模型的研究进展 [J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1391-1396.
- [25] 卞林根. 北冰洋与青藏高原近地面边界层湍流参数研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2001.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2) …… 表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问. 对未刊稿件一般不退, 请作者自留底稿.

12. 投稿请附作者单位详细地址、邮编、电话号码、电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn