

水稻不同生长期稻田能量收支、CO₂ 通量模拟研究*

高志球 卞林根 陆龙骅 丁国安

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要

利用国家自然科学基金重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程与生态系统的相互作用”野外观测资料,将1999年常熟稻田水稻四个不同生长期(插秧、拔节、抽穗和成熟)的太阳辐射、水汽压、气温和水平风速及降水作为简化生物圈(SiB2)模式的5个强迫变量,在合理设计模式参数的前提下,分别模拟了上述四个阶段的能量收支、CO₂ 通量。模拟结果表明:在水稻不同生长阶段的感热、潜热和下垫面热通量占净辐射的比例不同;CO₂ 通量的模拟结果与1996年国际稻田试验结果相似。该研究为利用自动气象站网的资料估计各站能量收支、CO₂ 通量、土壤水分平衡,以及土壤温度廓线提供了新证据。

关键词: 稻田 SiB2 模式 能量收支 CO₂ 通量

引言

全球大部分陆地被植被覆盖,人类食物产量很大程度上依赖于农业生态区的生产率。农业生态区在全球能量和水汽收支中也扮演了重要角色,深入理解典型农田生态区不同时期能量交换和 CO₂ 通量是全球气候研究的迫切需要。有关农业生态区能量交换和 CO₂ 通量的研究一直备受全世界科学家关注,最近几年研究成果不断涌现。1996年在日本本州岛西南岸的冈山进行了国际稻田试验 IREX96 (International rice experiment 96),在此观测资料基础之上,Harazono 等^[1]研究了水稻抽穗前期能量分配,同时指出稻田日蒸散量与开阔水面相当,其值介于 4.2 ~ 5.8 mm·d⁻¹ 之间,而且稻田能量分配比例与灌溉无关;Miyata 等^[2]研究了灌溉与 CO₂ 通量的关系,指出白天排水区稻田吸收的 CO₂ 比注水稻田少 23%,而夜间排放的 CO₂ 却几乎是注水稻田的两倍,排水区 CO₂ 的日平均通量为 14.5 g·m⁻²·d⁻¹,小于满水区一半。Katul 等^[3]利用高阶闭合模式估算了水稻冠层内 CO₂ 源汇分布,并与观测值进行了比较,结果一致。

自从1996年 Sellers 等推出简化生物圈模式 SiB2 (Simple Biosphere model version 2)^[4-6]以来,该模式愈来愈多地被用来模拟不同地区能量交换和 CO₂ 通量^[7-13],这些研究普遍将 SiB2 模拟结果与实测能量平衡方程各分量分别进行了比较,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。因而可以用 SiB2 模拟研究农业生态区的能量交换、CO₂ 通量以及土壤温湿度分布,然而到目前为止,除了日本和韩国几位科学家正在利用

* 该研究工作由国家自然科学基金重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程与生态系统的相互作用”资助。

2002-02-25 收到,2003-03-20 收到再改稿。

SiB2 和 IREX96 资料研究日本本州岛西南岸的冈山稻田能量交换(私人通信)外,尚无更多关于 SiB2 模拟稻田能量收支的研究报道。

作为国家自然科学基金重大项目“长江三角洲低层大气物理化学过程与生态系统的相互作用”中关于“长江三角洲典型农田生态区近地层动量、热量、辐射和水汽通量观测与研究”的工作之一,本文利用长江三角洲稻田水稻插秧、拔节、抽穗和成熟期的部分观测资料,模拟了该地区水稻不同生长期的能量通量、CO₂ 通量,目的在于比较水稻不同生长期能量交换和 CO₂ 通量。

1 测量

测量期为 1999 年 5 月 27 日至 11 月 4 日,站点选择在位于长江三角洲腹地常熟市南郊中国科学院常熟农业生态实验站(31°33' N, 120°38' E),海拔高度为 1.3 m 的稻田内,土壤属于粘土类型,太阳总辐射由美国辐射计测量,其型号为 Epply PSP;芬兰 VAISALA 公司的温湿度仪(型号为: HMD35P)的架设高度为 4 m,观测塔距离最近障碍物的距离大于障碍物高度的 10 倍。

2 SiB2 简介、参数设置、初始化及强迫变量确定

2.1 模式简介

Sellers 等^[4~6]已经对 SiB2 进行了详细的描述。所用的控制方程如下:

$$H = H_c + H_g \quad (1)$$

其中 H 是感热通量, H_g 指裸土地面感热通量, $H_g = \frac{(T_g - T_a) \rho_p}{r_d}$; H_c 是冠层部分感热通量, $H_c = \frac{(T_c - T_a) \rho_p}{r_b}$ 。

$$\lambda E = \lambda E_{ct} + \lambda E_{gs} \quad (2)$$

其中 λE 是潜热通量, λE_{gs} 是裸土地表潜热通量, $\lambda E_{gs} = \frac{(h_{soil} e^*(T_g) - e_a) \rho_p / \gamma}{r_{soil} + r_d}$, 且 λE_{ct} 是冠层潜热通量, $\lambda E_{ct} = \frac{(e^*(T_c) - e_a) \rho_p / \gamma}{r_c + 2 r_b}$ 。

SiB2 中净辐射计算公式表示为:

$$R_n = R_{nc} + R_{ngs} \quad (3)$$

其中 R_n 是净辐射, R_{ngs} 是裸土地表净辐射, $R_{ngs} = \langle F_{gs} \rangle - \alpha_s T_{gs}^4 + \alpha_s T_c^4 V_c \delta_t$, 而 R_{nc} 是植被冠层净辐射, $R_{nc} = \langle F_c \rangle - 2 \alpha_s T_c^4 V_c \delta_t + \alpha_s T_{gs}^4 \delta_t$ 。

$$C = A_C - R_D - R_{soil} \quad (4)$$

其中: C 是二氧化碳通量, A_C 是总二氧化碳通量, R_D 是水稻呼吸需要的二氧化碳; $A_C -$

R_D 是植被部分的净二氧化碳通量, $A_C - R_D = \frac{c_a - c_i}{p(1.6 r_c + 2.8 r_b)}$, 方向向下, R_{soil} 是裸土

地表二氧化碳通量, 方向向上, $R_{soil} = \frac{c_{soil} - c_a}{p(1.4 r_d)}$ 。

其中, T_a 为冠层空隙(CAS)内的空气温度(K); E_a 为冠层空隙(CAS)内的水汽压(Pa); ρ 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); c_p 为比热($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); γ 为生物常数($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$); r_b 为总体冠层边界层阻尼(对感热而言)($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_d 为裸土地表和冠层空隙之间空气动力学阻尼(对感热而言)($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_a 为冠层空隙和参考高度之间空气动力学阻尼(对感热而言)($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_c 为上层植被的腔体阻尼(对水汽压而言)($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); r_{soil} 为裸土表面阻尼($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); h_{soil} 为裸土表面孔体内相对湿度; R_{soil} 为土壤呼吸($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); c_m 为参考高度上 CO₂ 的浓度(Pa); c_a 为冠层空隙(CAS)内 CO₂ 压强(Pa); c_i 为整个冠层叶子内部 CO₂ 压强的总和(Pa); c_{soil} 为裸土表面 CO₂ 压强(Pa); p 为大气压强(Pa)。

在 SiB2 中,用控制方程(5)~(7)分别计算植被、裸土地表和深土的温度(T_c, T_g, T_d),

$$C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = R_{nc} - H_c - \lambda E_c \quad (5)$$

$$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = R_{ng} - H_g - \lambda E_g - \frac{2\pi C_d}{\tau_d} (T_g - T_d) \quad (6)$$

$$C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{1}{2(365\pi)^{1/2}} (R_{ng} - H_g - \lambda E_g) \quad (7)$$

设 $S = C_c \frac{\partial T_c}{\partial t}$, 为水稻热存储; $G = C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{2\pi C_d}{\tau_d} (T_g - T_d)$, 为裸土热存储。本文将水稻热存储与裸土热存储之和称为下垫面热存储。Sellers 等^[4-6]详细描述了公式(5)~(7)中所有符号的物理意义,为简洁起见,这里不复赘述。

由公式(5)~(7)可知,在 SiB2 中是用“强迫—恢复”方法来计算地表和深土温度,以及植被冠层的温度。用冠层水储存在计算降水截留,渗下的水储存在到 3 层土壤中,由上而下分别称为表面层、根区和补充层,对应的厚度分别为 0.02 m, 0.13 m, 和 0.85 m。水的传输在 3 层之间被描述为扩散过程,植物的根穿透上两层,水能够在补充层中发生重力排泄。

2.2 参数设置

一些近地层参数由测量得到,因三维超声风速表(DA600-3 T)安装高度为 4.0 m,所以参考面也定在这一高度上。

不随时间变化的植被参数包括:(i) 植被形态参数,包括植物高度、冠层覆盖比、叶面角分布函数、根深度等等,本文所取的这些参数值都来自实际测量。水稻冠层顶和底部的高度、冠层覆盖比和叶面指数随着水稻生长而不断改变。例如:抽穗期中,取水稻冠层顶高度为 0.72 m,底部高度 0.2 m,冠层覆盖比为 0.9 和叶面指数为 3.7。球形分布叶面角因子为 0,动量传输参数 G_1 和 G_4 分别设置为 1.449 和 11.785^[5]。由于观测场地平坦,平均地形坡设为 0.04。

(ii) 光特征参数是指叶子的传输率和反射率以及土壤的反射率。考虑到与波段和植物生命相关的 4 种情况:活着的植物在可见光波段,活着的植物在近红外波段,枯死的植物在可见光波段,枯死的植物在近红外波段,它们对应的叶层反射率和传输率分别设为 0.105, 0.58, 0.36, 0.58, 0.07, 0.25, 0.22 和 0.38,土壤的可见和近红外反射率分别设为 0.11 和 0.225。所有物理性质由参考文献[5]的表 5 中第 9 种类型得到。植物冠层顶的最大核酮糖酶催化能力^[5]为 $0.0001 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光合作用内部量子效应参数为 0.08

$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 配对指数和叶子蒸腾因子分别为 0.95, 0.015, 根据植物腔体传导模型, 植物类型 C_4 的腔体倾斜因子和最小腔体传导率分别设为 4.0 和 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。温度阻碍因子 S_1, S_3, S_5 分别表示光合作用中高温剪切因子、低温剪切因子和呼吸中高温剪切因子, 其值分别设为 $0.3 \text{ K}^{-1}, 0.2 \text{ K}^{-1}, 1.3 \text{ K}^{-1}$ 。半阻碍温度参数 S_2, S_4, S_6 也分别表示光合作用中高温剪切因子、低温剪切因子和呼吸中高温剪切因子, 它们的值分别设为 313 K, 288 K, 328 K。半阻碍水势参数为 -200 m。

抽穗期间, 水稻绿色部分 (N) 参数设为全绿色值 (1.0)。 Z_0 为空气动力粗糙度, 取为 $0.007 \text{ m}^{[14]}$ 。考虑到植被冠层高度, 植物的零平面位移 (D) 设为 0.5 m。

总体边界层阻抗系数 C_1 , 土壤与水稻层之间的阻抗系数 C_2 的取值范围分别在 1 ~ 16 和 10 ~ 1000 之间, 水稻的 C_1 和 C_2 分别取为 7.05, 232.5。从参考文献 [5] 的表 4 中查到该观测站土壤水势、饱和水传导率、土壤湿度指数和土壤空隙度, 分别为 -0.36 m, $2.5 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 8.52 和 0.44。

2.3 初始化

SiB2 需要一些正确的初始值。它们是水稻温度、水体温度、深土温度、冠层空气间隙温度、参照高度 (4.0 m) 上气温、土壤表面层湿度、根域湿度、交换域湿度。这些值都来自实际观测和估计。

2.4 强迫变量

SiB2 需要 5 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来自实际观测, 另一个强迫变量: 向下长波辐射来自 Brunt^[15] 的参数化方案。

3 水稻不同生长期能量和 CO_2 通量的模拟结果分析

3.1 能量通量

稻田表面能量平衡方程可以描述为:

$$R_n = \lambda E + H + G + S + M \quad (8)$$

其中 R_n 是净辐射, λE 和 H 分别是潜热和感热通量, G 是土壤和水中热存储, S 是冠层热存储, M 是光合作用呼吸耗能, Harazono 等^[1] 指出 M 不足 R_n 的 1%, 因而可以忽略。图 1 分别给出了插秧、拔节、抽穗和成熟期能量平衡各分量随时间的变化。由图 1 可以看出平均状况: ①由于太阳高度角的降低, 由水稻的插秧、拔节、抽穗到成熟期, 净辐射逐渐减少; ②水稻不同生长期中能量的分配比例不同。潜热通量始终占净辐射的绝大部分, 平均下垫面热通量在插秧期为净辐射的 -12%, 拔节期为净辐射的 5%, 抽穗期几乎为 0, 而成熟期则为 -59%, 如图 2 所示。这些结果表明: 平均情况下, 插秧期稻田为水充盈, 水体白天吸收热量, 夜间释放热量, 拔节期下垫面吸收热量, 进行热存储; 抽穗期下垫面不吸收热量, 也不释放热量, 而成熟期下垫面释放热量, 其量值甚至达到净辐射的 59%。这些结果是由太阳高度角在由插秧、拔节、抽穗, 直至成熟这 6 个多月期间逐渐降低, 使得太阳辐射减少, 以至净辐射日趋下降所致。由图 1 看出, 成熟期夜间净辐射为 $-50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这是由于夜间下垫面放出的热红外辐射大于大气长波辐射所致, 该时段内大气在逐渐降温,

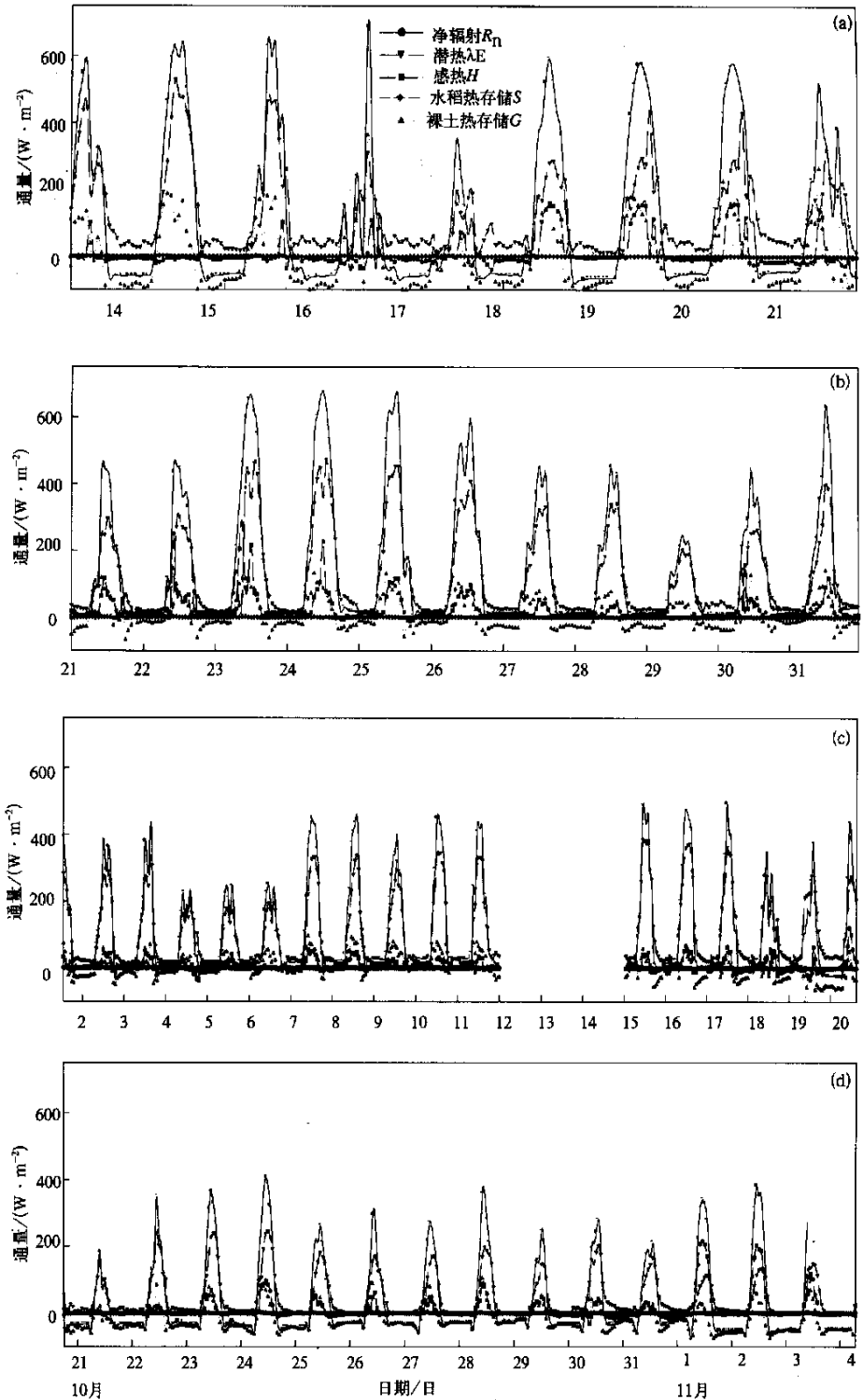


图1 1999年常熟观测站水稻不同生长期能量平衡各分量随时间变化
(a) 插秧期(6月), (b) 拔节期(7月), (c) 抽穗期(9月), (d) 成熟期(10~11月)

夜间下垫面向大气释放热量。

由图 2 可知,插秧期潜热占净辐射的 105%,感热占 7%;抽穗期潜热占净辐射的 91%,感热占 9%;成熟期潜热为净辐射的 123%,感热占 36%。由线性拟合分析可知,四个时期平均而言,潜热与净辐射相关性最好,相关系数为 0.90,感热与净辐射的相关系数为 0.76,而下垫面热通量在拔节期与净辐射的相关系数为 0.78。

3.2 CO₂ 通量

图 3 分别给出了四个不同时期 CO₂ 通量,为了便于与本文其余图比较,图 3 将向上排放 CO₂ 设为正,向下为负,可见 CO₂ 通量表现出明显的

日变化:①白天由于光合作用,水稻吸收 CO₂;夜间水稻向大气放出 CO₂,但其值较白天小 1 个量级;②由于抽穗期间叶面积指数约为 4.5^[3],且绿色部分占 100%,所以白天水稻吸收较拔节和成熟期更多的 CO₂,平均 CO₂ 通量最大值为 3.6 g·m⁻²·h⁻¹,出现在光合作用最旺盛时刻,即中午 12:00,此时净辐射最大;拔节期尽管 100%绿色,但叶面积指数约为 3.5 左右,所以平均 CO₂ 通量最大值为 3.1 g·m⁻²·h⁻¹;而成熟期尽管稻穗增加了叶面积指数,但绿色部分仅占 20%左右,所以此时的光合作用较小,平均 CO₂ 通量最大值仅为 2.4 g·m⁻²·h⁻¹。统计分析表明:平均情况下,CO₂ 日通量在插秧期为 29.14 g·m⁻²·d⁻¹,拔节期为 16.56 g·m⁻²·d⁻¹,抽穗期为 25.76 g·m⁻²·d⁻¹,成熟期为 15.27 g·m⁻²·d⁻¹。可见插秧期注水稻田吸收的 CO₂ 日通量比拔节、抽穗、成熟期都大,这是由于水体阻碍了土壤排放 CO₂,方程(4)中 $R_{s,soil}$ 为零,从而使整个下垫面的 CO₂ 日通量增加。成熟期白天吸收的 CO₂ 通量较小的另一个原因是稻田已经排灌,导致土壤排放 CO₂,方程(4)中 $R_{s,soil}$ 大于零。Miyata 等^[2]研究了国际稻田实验中灌溉与 CO₂ 通量的关系,指出白天排水稻田吸收的 CO₂ 比注水稻田少 23%,排水区日平均通量为 14.5 g·m⁻²·d⁻¹。可见我们的模拟结果与 Miyata^[2]吻合。另外,我们注意到夜间是稻田下垫面释放 CO₂ 的过程,且拔节、抽穗期相当,大于插秧、成熟期。

3.3 下垫面蒸散

一般将冠层蒸腾、截留和裸土地表蒸发和截留统称为蒸散。图 4 分别给出了四个不同时期下垫面的蒸散,可见:①平均情况下,由插秧、拔节、抽穗、直至成熟过程中,水稻冠层的蒸腾在下垫面总蒸散中所占的份额逐渐增加。②插秧期白天蒸散的最大值可达到 0.78 mm·h⁻¹,拔节期白天蒸散的最大值可达到 0.70 mm·h⁻¹,抽穗期的最大值可达到 0.60 mm·h⁻¹,成熟期最大值为 0.37 mm·h⁻¹。这是由于不同时期水稻叶面积指数不同。

统计分析表明:平均情况下,日蒸散在插秧期为 4.28 mm·d⁻¹,拔节期为 4.17 mm·d⁻¹,

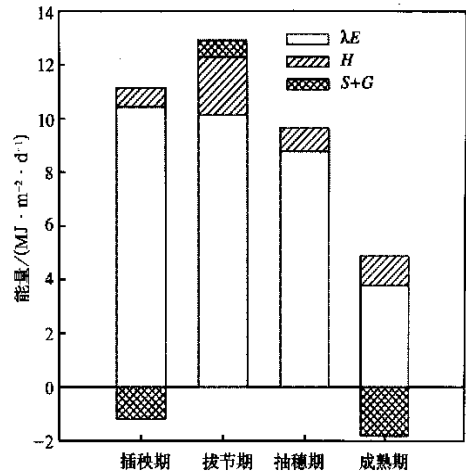


图 2 1999 年常熟观测站水稻不同生长期稻田能量分配柱状图

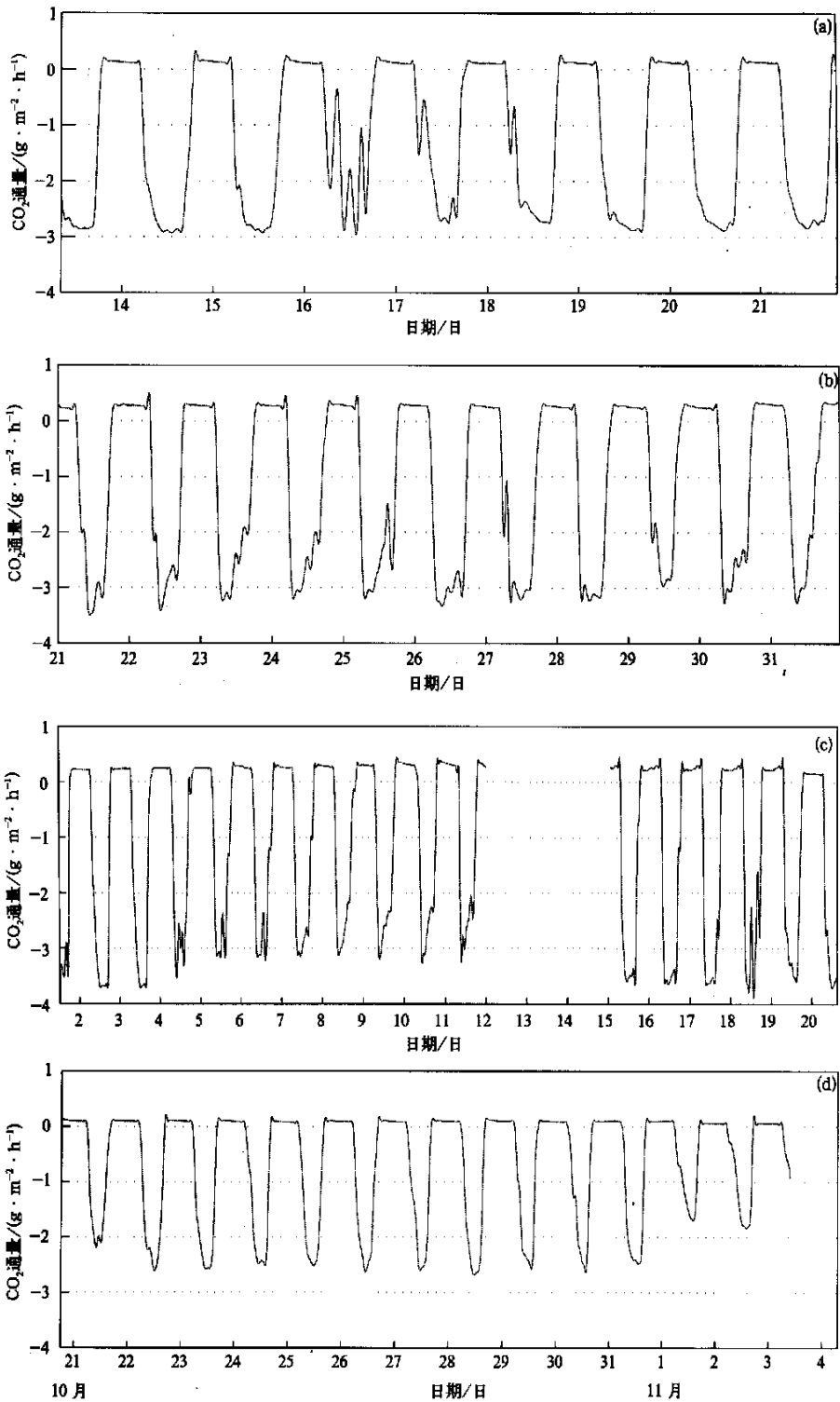


图3 1999年常熟观测站水稻不同生长期 CO₂ 通量随时间变化

(a) 插秧期(6月), (b) 拔节期(7月), (c) 抽穗期(9月), (d) 成熟期(10~11月)

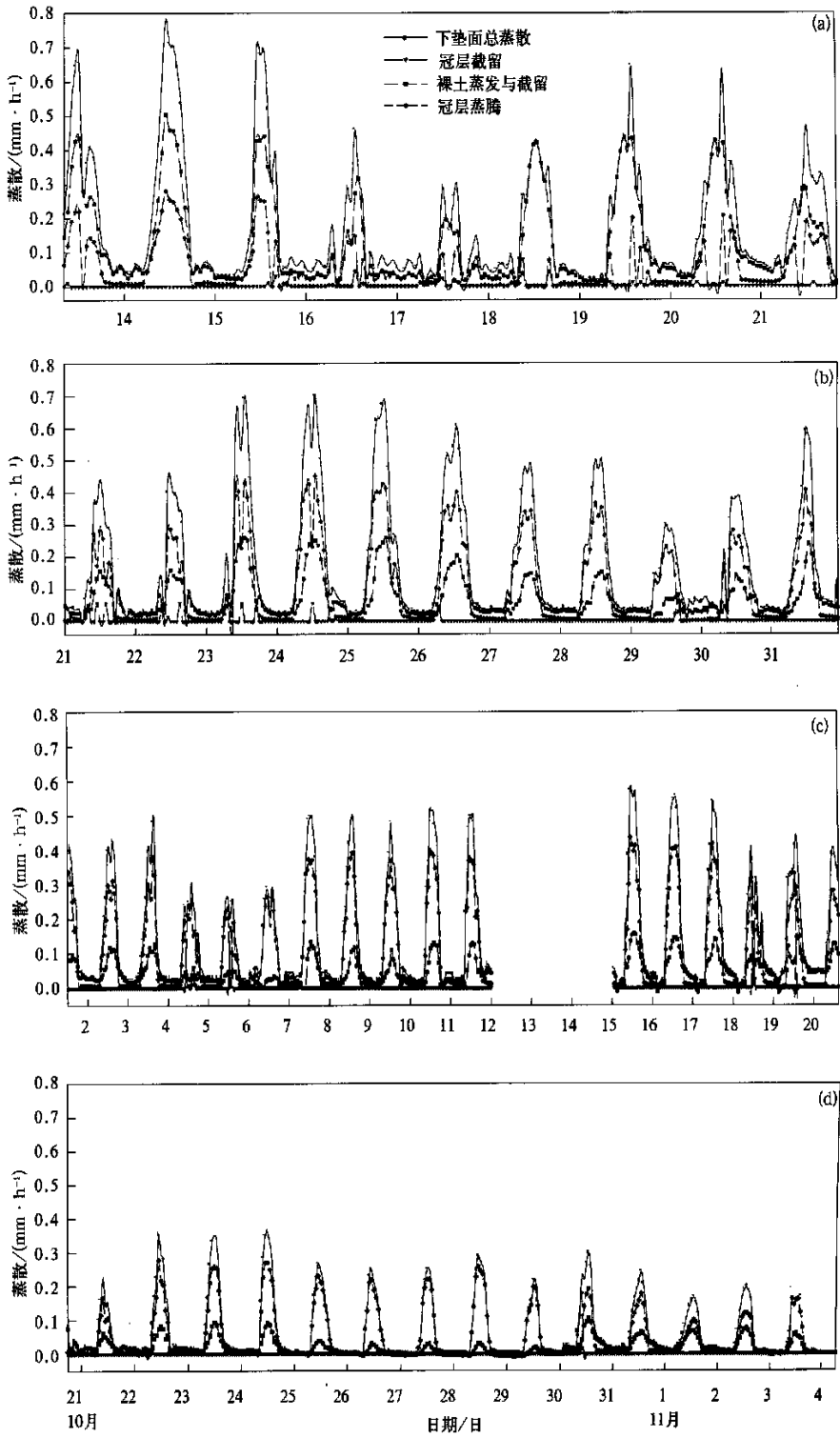


图4 1999年常熟观测站水稻不同生长期下垫面蒸散随时间变化

(a) 插秧期(6月), (b) 拔节期(7月), (c) 抽穗期(9月), (d) 成熟期(10~11月)

抽穗期为 $3.61 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 成熟期为 $1.54 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 即:由插秧、拔节、抽穗到成熟期,下垫面的蒸散逐步减少。Harazono 等^[1]研究了 1996 年国际稻田实验中拔节—抽穗前期稻田蒸散量,指出稻田日蒸散量与开阔水面相当,其值介于 $4.2 \sim 5.8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。因此,本文模拟的拔节、抽穗期日蒸散总量较 Harazono 等^[1]的结果接近、偏小。

4 讨 论

4.1 感热通量模拟值与测量值的比较

为了验证模拟结果的可靠性,本文将抽穗期感热通量的模拟值和测量值进行了比较(图 5),模拟结果和测量结果基本一致,由此可以推断模式参数设计是合理的。

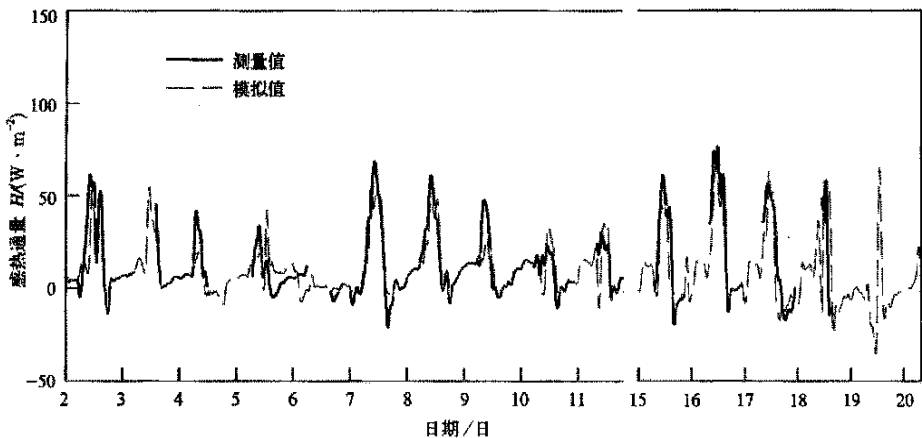


图 5 1999 年 9 月抽穗期感热通量模拟值和测量值比较

4.2 波恩比分析

波恩比定义为感热和潜热通量的比值,即 $\beta = H / \lambda E$,不同下垫面具有不同的 β 。本文模拟结果表明:平均情况下,插秧期 $\beta = 0.07$,拔节期 $\beta = 0.21$,抽穗期 $\beta = 0.10$,成熟期 $\beta = 0.30$ 。插秧、抽穗期 β 值与海洋表面的值一致,说明这个时期的蒸发很大;拔节、成熟期的 β 则相当于灌溉的果园和草地的值^[14]。

4.3 拔节期土壤温度的模拟

图 6 给出了模拟的拔节期冠层、土壤、深土温度随时间的变化和测量的实时降水。可见,水稻冠层、土壤的表层温度都呈现明显的日变化,而深土温度几乎没有日变化。7 月 29 日有强降水时,无论是冠层,还是土壤表层的温度的最大值都有明显降低。这证明了由 SiB2 模拟的冠层、土壤表层温度对降水敏感。

4.4 拔节期土壤湿度的模拟

定义土壤湿度 W 为 θ / θ_s , θ 土壤体积水含量, θ_s 土壤空隙度。图 7 给出了模拟的拔节期土壤湿度分布廓线,土壤表层、根区和深土的土壤初始湿度为 0.925,随着土壤表面的蒸发和植物吸收水分,土壤表面层、根区和深土区土壤湿度逐渐下降,且土壤表面层内湿度减少的幅度最大。在土壤湿度逐渐减少过程中,土壤水分表现出明显的日变化。7

月 29 日有强降水时,三层土壤水分都作出反应,其中土壤表层湿度立即飙升至 1.0,随后随着蒸发而降低,由 SiB2 模拟的冠层、土壤表层湿度对降水敏感证明了土壤湿度模块设计合理。

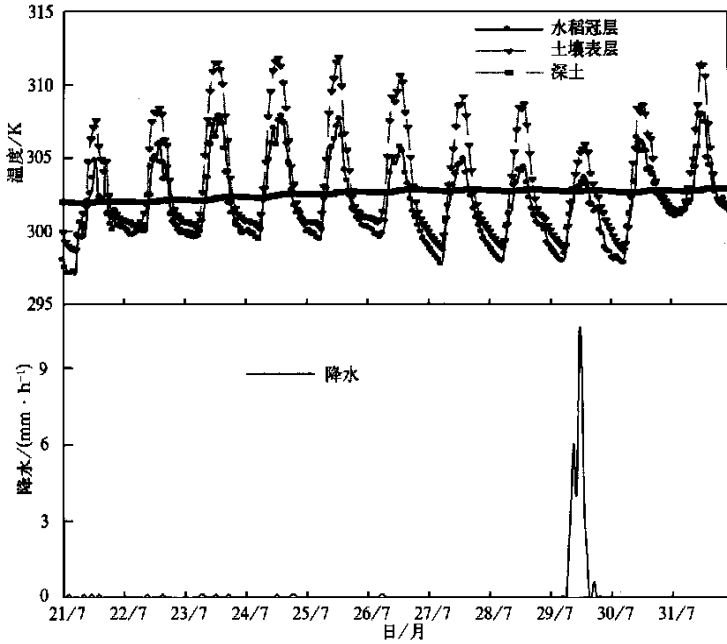


图 6 模拟的拔节期冠层、土壤、深土温度随时间的变化和测量的实时降水

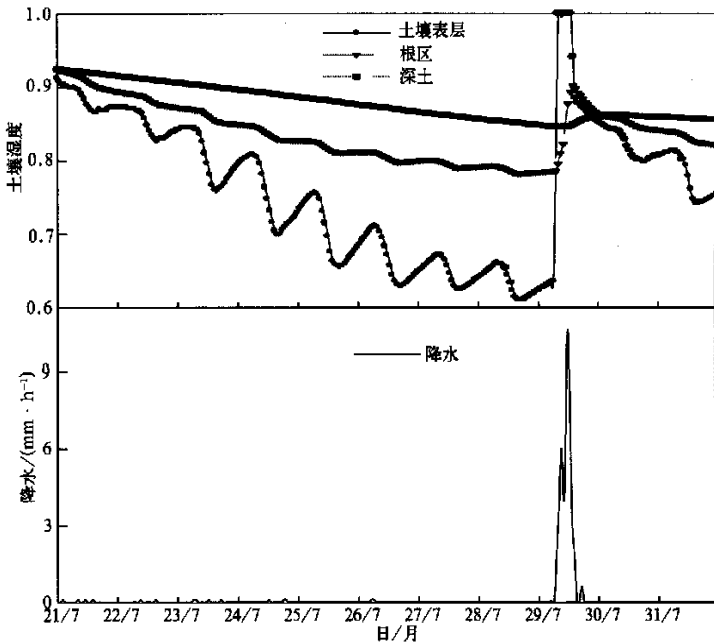


图 7 模拟的拔节期土壤湿度分布廓线和测量的实时降水

5 结 论

(1) 本文分别模拟了水稻四个不同生长期(插秧、拔节、抽穗和成熟),稻田表面的能量收支和 CO₂ 通量。结果表明:由于下垫面湿度的变化,各生长期能量分配不同,潜热始终占净辐射的绝大部分。波恩比分析表明,四个时期的波恩比不同,插秧期最小,为0.07。下垫面热通量在四个生长期变化显著,平均情况而言,拔节期为正,抽穗期为零,插秧和成熟期为负。

(2) CO₂ 的模拟结果表明:白天稻田下垫面吸收 CO₂,夜间放出 CO₂,白天吸收的 CO₂ 比夜间排放值大一个量级。白天稻田吸收或夜间稻田排放的 CO₂ 的大小为抽穗期大于拔节期大于插秧期大于成熟期。

(3) 通过分析拔节期土壤温、湿度分布的模拟结果和比较抽穗期感热通量模拟值和测量值,证明模式参数设置基本合理。

(4) 本文较成功的模拟意味着可以用 SiB2 结合自动气象站网资料进行区域能量收支、CO₂ 通量和土壤温湿度廓线模拟估算研究。

(5) 更深入的研究需要高质量的观测结果支持。

致谢:该研究是在周秀骥院士指导下完成的,谨致谢忱。感谢中国气象科学研究院气候研究所逯昌贵等在常熟野外观测期间付出的努力。

参 考 文 献

- 1 Harazono Y, Kim J, Miyata A, et al. Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 2018 ~ 2092.
- 2 Miyata A, Leuning R, Thomas O, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, **102**: 287 ~ 303.
- 3 Katul G G, Leuning R and Kim J. Estimating CO₂ source/sink distributions within a rice canopy using higher-order closure models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, **98**: 103 ~ 125.
- 4 Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, 1996a, **9**: 676 ~ 705.
- 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. *Journal of Climate*, 1996b, **9**: 706 ~ 737.
- 6 Randall D A, Dazlich D A, Zhang C. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part III: The greening of the Colorado State University general circulation model. *Journal of Climate*, 1996, **9**: 738 ~ 763.
- 7 Zhang C, Dazlich D A, Randall D A, et al. Calculation of the global land surface energy, water and CO₂ fluxes with an off-line version of SiB2. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**(D14): 19061 ~ 19075.
- 8 Schelde K, Kelliher F M, Massman W J, et al. Estimating sensible and latent heat fluxes from a temperate broad-leaved forest using the Simple Biosphere (SiB) model. *Agric. For. Meteorol.*, 1997, **84**: 285 ~ 295.
- 9 Doran J C, Hubbe J M, Liljegren J C, et al. A technique for determining the spatial and temporal distributions of surface fluxes of heat and moisture over the Southern Great Plains Cloud and Radiation Testbed. *J. of Geophys. Res.*, 1998,

- 103 (D6) : 6109 ~ 6121 .
- 10 Colello G D, Griver C, Sellers P J, et al. Modeling of energy, water, and CO₂ flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2: May-October 1987. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1998, **55**: 1141 ~ 1169 .
- 11 Chae Namyi, Gao Zhiqiu and Kim Joon. Testing the energy budget closure in a Tibetan prairie using the version 2 of the Simple Biosphere Model (SiB2). *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 2000, **81**(22) : 5 .
- 12 Gao Zhiqiu, Chae Namyi and Kim Joon. Simulation of Surface Temperature, Water Balance and Soil Wetness in the Tibetan Prairie Using the Simple Biosphere Model 2. The Proceeding of the 2nd International Workshop on TIPEX/GAME-Tibet, 2000. 13 ~ 16 .
- 13 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. *应用气象学报*, 2002, **13**(2) : 129 ~ 141 .
- 14 Stull R B. *Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers Dordrecht, 1988. 290, 380 .
- 15 Monteith J L, *Principles of Environmental Physics*. American Elsevier Publishing Company, Inc. 1973. 33 ~ 38 .

MODELING OF ENERGY AND CO₂ FLUXES DURING DIFFERENT GROWTH PERIODS OVER RICE FIELD BY USING SiB2

Gao Zhiqiu Bian Lingen Lu Longhua Ding Guoan
(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

SiB2, forced by five meteorological variables, was adopted to model the energy budget and CO₂ flux during stem extension, tassel and mature period over rice field in Changshu country of Jiangsu province, China. These meteorological variables are solar radiation, vapor pressure, air temperature, horizontal wind speed and precipitation from in situ observation. Result shows that the energy partitions over these periods are different, so do CO₂ fluxes. The related results are close to those of IREX96. The SiB2 was demonstrated with automatic weather station(AWS) data and could be used to estimate the energy components, CO₂ flux, soil wetness and soil temperature profile.

Key words: Rice field SiB2 Energy budget CO₂ flux .