

# 华北平原农田水热通量与作物水分 利用效率的特征与模拟\*

秦 钟<sup>①</sup> 于 强<sup>②\*\*</sup> 许守华<sup>②</sup> 胡秉民<sup>①③</sup> 孙晓敏<sup>②</sup> 刘恩民<sup>②</sup>  
王吉顺<sup>②</sup> 于贵瑞<sup>②</sup> 朱治林<sup>②</sup>

(①浙江大学生命科学院生态研究所, 杭州 310029; ②中国科学院地理科学与资源研究所,  
北京 100101; ③浙江大学理学院, 杭州 310029)

**摘要** 在中国科学院禹城综合试验站, 采用涡度相关技术对夏玉米生长期净辐射( $R_n$ )、水汽通量( $LE$ )、感热通量( $H_s$ )和土壤热通量( $G$ )进行了观测, 并应用农田生态系统模型 RZ-SHAW 对水热过程和作物水分利用效率进行了模拟和分析. 结果表明, 夏玉米水汽通量具有明显的日变化与季节变化,  $R_n$  大部分用于玉米潜热的消耗, 水汽通量与净辐射的比值( $LE/R_n$ )随生长阶段呈上升趋势, 在灌浆期达最大, 约 60%左右, 但比用 RZ-SHAW 模型模拟的结果略低; RZ-SHAW 模型模拟得到的夏玉米日蒸散量与实测值的变化比较符合; 逐时水汽通量与相应时段内涡度相关实测值一致性指数( $I_A$ )均在 0.75 以上, 均方差(RMSE)在  $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以下.  $LE$  日变化呈倒“V”型,  $H_s$  呈倒“U”型并偏向午前, 二者出现峰值的时间不同,  $H_s$  出现在 11:30 左右,  $LE$  出现在 13:00 左右, 比  $H_s$  推迟一小时左右.  $\text{CO}_2$  通量日变化呈不对称“V”型, 峰值出现时间在 11:30 左右. 夏玉米 4 个生育期的群体水分利用效率( $(Fc+R_s)/LE$ )在日出以后, 随着光强的增强, 水分利用效率迅速升高, 至 10 时左右达到最大后开始下降, 其最大水分利用效率为  $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均水分利用效率为  $10.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**关键词** 水汽通量  $\text{CO}_2$  通量 水分利用效率 RZ-SHAW 模型 玉米 华北平原

据报道, 农业用水中有绝大部分, 甚至 99% 是通过蒸散的方式最终以汽态的形式返还到大气<sup>[1]</sup>. 有关土壤水分运行、作物蒸腾规律、SPAC 系统界面的水

分传输和热量交换的系统研究对提高农田水分的有效利用率和水资源的有效管理具有重要意义. 实地观测和模型估算是测定蒸散最主要的两种途径. 近

2004-07-14 收稿, 2004-11-01 收修改稿

\* 国家海外杰出青年合作研究基金项目(批准号: 40328001)、中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2002CB412501)共同资助

\*\* E-mail: yuq@igsrr.ac.cn

年来,随着实验设备、观测手段、系统分析与模型模拟技术等的不断提高,作物蒸散实验与模型模拟相融合,对农田蒸散、显热输送的研究也日趋成熟和深入。

在诸多对蒸散进行测定的方法中,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汽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、CO<sub>2</sub> 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<sup>[2]</sup>。

长期以来,SPAC 水分能量传输模型在从最为常见的是基于 Penman-Monteith<sup>[3,4]</sup>公式的单层“大叶”模型到 Shuttleworth 和 Wallace<sup>[5-7]</sup>提出的双层模型,再到 Oltehev<sup>[8]</sup>,Kustas<sup>[9]</sup>,Kim<sup>[10]</sup>等人在一层或二层模型的理论思想上提出的多层模型的发展过程中,有关蒸散及水汽传输的过程、影响机制等也得到了进一步的明确和详细的描述,其中最具代表性的是以美国农业部提出基于 S-W 理论的 RZWQM(Root Zone Water Quality Model)模型和 Flerchinger<sup>[11]</sup>提出的多层水热通量模拟模型 SHAW (Simultaneous Heat and Water)。

RZWQM 最初用于模拟非饱和或饱和土壤条件下的水分和溶质运移,后经不断的发展成为一个描述农田生态系统物理、生物化学过程的综合性过程模型,可用于模拟作物生长、根系水分、养分、溶质迁移等过程,模型中使用了扩展的 Shuttleworth-Wallace 模型,可对地表(裸地或有覆盖的地表)的蒸发和冠层蒸散分别进行计算<sup>[12]</sup>;SHAW 模型则涉及到土壤的冻结和消融、土壤蒸发和作物蒸腾等过程,它将植物冠层、雪被、凋落物和土壤层组成了一个多层体系,对 SPAC 水热传输过程进行更为详细的模拟<sup>[13-16]</sup>。鉴于 SHAW 模型的这一功能,使其与 RZWQM 相结合,将促使 RZWQM 对越冬过程中土壤的温度、雪被、霜层以及水、热经雪被、地表残茬的传输等相关过程进行模拟的功能得以实现,扩展模型的适用范围。为此,Flerchinger<sup>[17]</sup>曾在美国 Pullman 和 Akron, Colorado 这两个地区的 6 个耕作与地表状况均不相同的观测点对这一结合模型进行了验证,结果发现用 RZ-SHAW 模拟的越冬期间土壤各层的温度、含水量、水势、雪

被及霜层的厚度等与 SHAW 模型模拟的结果有很好的-致性,前者在某种程度上与实测值更为接近。与此相对应的是在有关 RZ-SHAW 模型对冠层物理过程的模拟方面,目前尚未有相应的研究。本文利用中国科学院禹城综合试验站涡度相关的实测资料,在分析夏玉米生长季水汽通量变化规律的同时,对该模型模拟作物冠层内水分与能量传输的有效性进行了验证。

## 1 实验与方法

### 1.1 实验区概况

实验在中国科学院禹城综合试验站进行,该站位于山东省禹城市,北纬 36°57',东经 116°38',海拔高度为 20 m,属暖温带半湿润季风气候,多年平均温度 13.1℃,多年平均降水量 528 mm。土壤多为潮土和盐化潮土,农业生产以冬小麦+夏玉米一年两熟为主。冬小麦的生育期一般为 10 月上旬至翌年 6 月上旬,夏玉米的生育期从 6 月中旬至 10 月上旬。试验地与周围大片农区相连,构成大范围均一的下垫面,满足了试验要求盛行风向的风浪区长度。

### 1.2 观测方法

从 2002 年 10 月底开始,采用美国 Campbell 公司生产的涡度相关系统在禹城综合试验站对农田水热、CO<sub>2</sub> 通量进行了连续的定位观测。本文采用的是 2003 年 6 月 14 日至 10 月 2 日(儒略日 DOY165 至 275)玉米整个生长季内共 111 d 的观测资料。

涡度相关观测系统主要由三维超声风速温度计(model CSAT3, Campbell Sci., Logan, UT)和快速响应的开路红外 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(IRGA, Li-7500, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA)组成,可直接测定冠层上方的三维风速、湿度、温度、CO<sub>2</sub> 浓度的平均值和瞬时脉动值;土壤热通量由埋放在行内或行间的土壤热流板测定(model HFP01SC<sub>L50</sub>);CR5000 型采集器与观测系统相连,采样频率为 10 Hz,每 30 min 输出 1 组平均值。同时进行的观测项目还有气压、净辐射、光合有效辐射、降水、土壤温度和水分等。

在实验期间,每隔 5 天对夏玉米的叶面积指数和高度进行测定,灌溉和施肥充分,使其生长不受水肥

限制。

### 1.3 数据处理

在玉米整个生育期观测时段内，因仪器维修、校正、故障等引起的数据记录缺失量占 5.67%。对采集到的每半小时的通量数据的合理性进行检测<sup>[18]</sup>，对不合理的 CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )、水汽通量( $LE$ )、感热通量( $H_s$ )及土壤热通量观测记录( $G_1$ ,  $G_2$ )分别占 0.06%, 0.48%, 0.73%, 3.06% 和 3.41%，据有关方法进行剔除和插值<sup>[18-20]</sup>。

涡度相关法可直接测定植被与大气间 CO<sub>2</sub>、水热通量，但在夜间大气层结比较稳定、湍流较弱时，从土壤和叶片扩散的 CO<sub>2</sub> 不能达到仪器测定高度，仪器测定的精确性降低导致夜间 CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )的值偏低。根据摩擦风速  $u^*$  与  $F_c$  间的关系可确定一个临界  $u^*$ <sup>[18,21]</sup>，如图 1，在  $u^* > 0.12 \text{ m s}^{-1}$  时， $F_c$  随  $u^*$  的增加而趋于稳定，这些值可以认为是正确的，而在此临界值之下所观测的 CO<sub>2</sub> 通量将舍去。此外，一次降雨 24 h 内的观测记录也被剔除。

夏玉米地的能量平衡为：

$$R_n = G + LE + H_s, \quad (1)$$

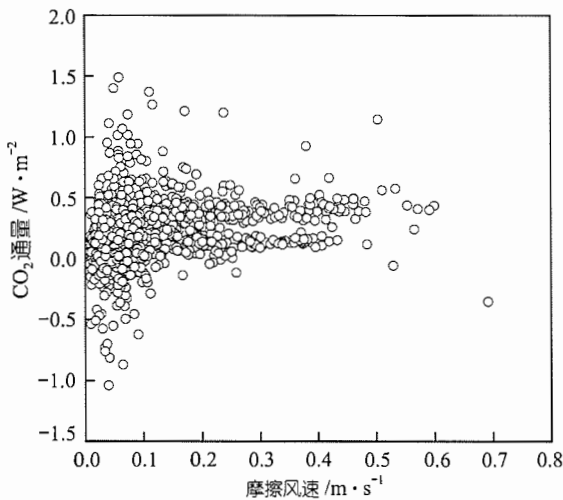


图 1 夜间 CO<sub>2</sub> 通量( $F_c$ )与摩擦风速( $u^*$ )

其中  $R_n$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为净辐射， $LE$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为水汽通量，其中  $L$  为水的汽化热 ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )， $E$  为水汽通量或蒸散量 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )， $H_s$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为感热通量， $G$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 为土壤热通量。以系统可供能量 ( $R_n - G$ ) 为自变量，消耗的能量 ( $LE + H_s$ ) 为应变量，用直线回归方程拟合为 (图 2)：

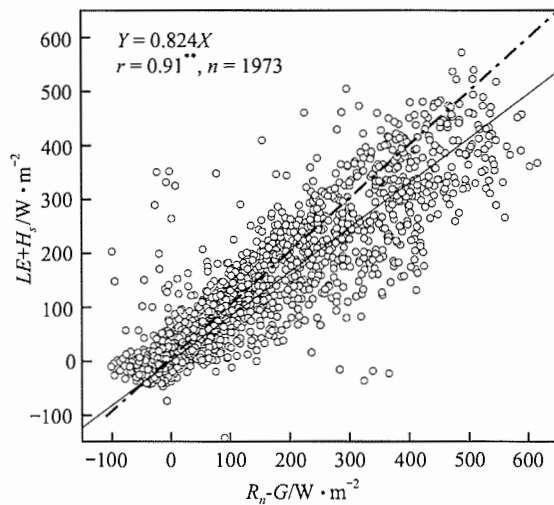


图 2 夏玉米生育期内可利用能量 ( $R_n - G$ ) 与潜热感热通量之和 ( $LE + H_s$ )

$$y = 0.824x, r = 0.91, n = 1973.$$

### 1.4 生长季的气候条件

夏玉米生长季气候条件是正常年型 (图 3)，在整个生育期间的降雨量为 270.4 mm，并进行了 3 次充足的灌水，生育期内土壤表层 (0~5 cm) 湿度的变化如图 3~5，整个生育期内 0~80 cm 土壤储水量一般维持在田间持水量的 65%~70% (图 3~6)，降水与灌溉能满足夏玉米生长的需要，无水分亏缺发生，因而观测结果可代表一般年份供水条件下夏玉米的田间蒸散规律。

### 1.5 模型与方法

RZ-SHAW 模型是 RZWQM 模型的扩展，是一个描述农田生态系统物理、生物化学过程的综合性模型，涉及到水分、养分运移、包括农药等的化学元素迁移、作物生长、田间管理等方面<sup>[17]</sup>。本文仅对其中描述作物冠层及其与大气间的水热传输的过程进行讨论和分析。

#### 1.5.1 辐射传输

在 SHAW 模型中，经某冠层反射、散射后的辐射被相邻冠层、凋落物、雪被或土壤吸收或返回到大气中。冠层、凋落物、雪被和土壤层的太阳辐射、大气长波辐射的交换及直接辐射、被透射、反射和吸收的向上或向下的散射辐射共同决定了辐射平衡的大小，

$R_n$ ,  $R_{nsub}$  分别指到达冠层以上或以下总的净辐射通量;  $G$  指的是从冠层进入下垫面层的热通量. 潜热和感热的传输受几个阻力如冠层边界层阻力( $r_a^c$ )、叶片的气孔阻力( $r_s^c$ )等的共同影响<sup>[12]</sup>.

$$r_s^c = \frac{r_s}{2LAI_{eff}}, \quad (13)$$

$$r_a^c = \frac{r_b}{2LAI}, \quad (14)$$

其中,  $r_b/2$  为单位植被表面积的平均叶片边界层阻力.

### 1.5.3 模型结合的实现

RZWQM 模型不考虑土壤表层的雪被, 认为土层表面温度与空气温度相同, 而实际上经冠层传输到达土壤表层的热量将会因植被冠层、残茬、雪被的存在而发生改变. 为了能对经冠层、残茬、雪被层后到达土壤的水热传输过程进行模拟, RZWQM 模型在与 SHAW 模型结合形成 RZ-SHAW 这一结合模型中, 保留了 SHAW 模型中净辐射、表层能量平衡、多层水热传输进行模拟的功能, 因而可用于对越冬过程进行模拟. 在非越冬季节, 使用者可选用 SHAW 方法来计算土壤层以上的水热传输, 或者使用由 Aiken<sup>[26]</sup> 等人提出的类似于 Penman 公式的 PENFLUX 方法来计算. 用 PENFLUX 方法所得到的表层土壤热通量  $G$  和  $R_n$  的边界条件也可用于 S-W 公式中土壤和残落物层的能量平衡方程的计算, 这些方法作为计算蒸散的不同途径出现在 RZ-SHAW 模型中.

在 RZ-SHAW 中, 对土壤层上方的水热传输过程的模拟与原 SHAW 模型的方法相同, 均用隐式有限差分的方式来描述的, 在每个时间步长内采用 Newton-Raphson 方法对其进行迭代求解, 在求解时需要在热通量方程和水通量方程间来回用 Newton-Raphson 方法进行重复迭代, 直至每一层的水热通量方程所得到的解连续多次在既定的误差范围之内, 此时的值即为所要求的通量. 根据 RZWQM 模拟的土壤水再分布得到的表土层土壤水势可作为水汽在冠层、雪被等内传输的下边界条件. 假设各土壤层的水分含量为常数, 用 Newton-Raphson 法可解出每层土壤的温度、水势及含冰量, 对各层的热通量方程迭代结束后, 对土壤表层的水汽传输进行迭代, 从而更新了冠层、

残落物层的水汽密度值, 当每层以不断迭代后求得的值在既定的误差范围之内(温度变化在  $0.01^\circ\text{C}$  以内, 水汽密度的变化不超过 1%)时, 返回 RZWQM 模型途径. 由此可知, 用 SHAW 途径模拟得到的水汽传输可作为 RZWQM 计算土壤水再分配时的蒸发量输入, 滞后了一个时间步长.

## 2 结果与分析

### 2.1 夏玉米农田能量物质传输的特征

#### 2.1.1 夏玉米辐射平衡与水热及 $\text{CO}_2$ 通量的日变化过程

将 2003 年夏玉米季 DOY202~DOY263(7-20~9-19)每天各个时段的水、热及  $\text{CO}_2$  通量平均得到冠层潜热、感热和  $\text{CO}_2$  通量日变化过程(图 4).  $LE$  日变化呈倒“V”型,  $H_s$  呈倒“U”型左偏(图 4(a)), 二者出现峰值的时间不同,  $H_s$  出现在 11:30 左右,  $LE$  出现在 13:00 左右, 比  $H_s$  推迟 1 h 左右.  $\text{CO}_2$  通量日变化呈不对称“V”型(图 4(b)), 峰值出现时间在 11:30.

#### 2.1.2 夏玉米辐射平衡与水热及 $\text{CO}_2$ 通量的季节变化过程

本研究按照夏玉米生育期划分为 6 个发育阶段, 对夏玉米冠层能量平衡各分量分别进行统计分析, 其值取各个生育阶段 7:00~19:00 之间的平均值. 由涡度相关实测结果可以看出, 水汽通量具有较明显的季节变化(图 5). 从播种至苗期, 由于土壤覆盖率低, 土壤接受的太阳辐射量大,  $LE$  略大于  $G$ , 进入拔节期后, 随着叶面积指数的增加, 冠层趋于郁闭, 蒸散量显著增大而土壤热通量迅速下降, 土壤热通量与净辐射的比值( $G/R_n$ )由苗期的 28.96% 迅速下降至乳熟期的 7.50%, 进入成熟期后, 由于玉米植株衰老死亡, 土壤热通量开始略为上升为 9.05%, 蒸散量下降. 在充分供水条件下, 水汽通量与净辐射的比值( $LE/R_n$ )随季节呈上升趋势, 在灌浆期间这一比例高达 60% 左右, 是夏玉米冠层能量的主要消耗项, 进入成熟期这一比例值有所下降, 但不显著.

图 6 是夏玉米整个生育期四个阶段的  $\text{CO}_2$  通量季节变化特征. 在夏玉米拔节期, 其叶面积指数较低, 冠层  $\text{CO}_2$  通量也较低, 其峰值为  $0.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . 随着生长发育叶面积指数增大, 冠层  $\text{CO}_2$  通量也升高,

至吐丝期达  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 这个时期是夏玉米生育最旺盛的时期, 同时水分利用效率也达最大. 到乳熟期  $\text{CO}_2$  通量逐渐降低, 峰值为  $1.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右.

### 2.1.3 夏玉米生长季水分利用效率特征

选取夏玉米季 4 个生育期半小时水汽及  $\text{CO}_2$  通量, 每个生育期选取连续 4 天的观测资料, 这一时段能代表整个玉米生育期日变化特征(图 7). 夏玉米四个生育期的群体水分利用效率( $F_c+R_s$ )/ $LE$  变化, 在晚上夏玉米主要表现为呼吸作用, 植株呼吸作用释放  $\text{CO}_2$ , 在日出日落前后, 呼吸消耗和光合转化处于平衡状态. 日出以后, 随着光强的增强, 水分利用效率迅速升高, 至 10 时左右达到最大后开始下降, 其最大水分利用效率为  $24.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均水分利用效率为  $10.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 这与石家庄地区的有关实验结果相近<sup>[27]</sup>.

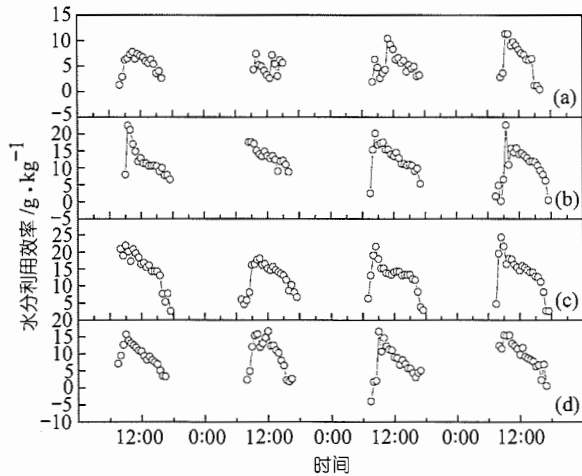


图 7 不同生育期水分利用效率

## 2.2 模拟

### 2.2.1 夏玉米叶面积指数的动态变化及模拟

叶面积指数是影响夏玉米能量平衡及蒸散在作物与土壤作用层分配的因素之一, 也是模型模拟作物生长、通量动态变化过程中的重要参数. 如图 8 所示, 用 RZ-SHAW 模型模拟得出的夏玉米生育期内的叶面积指数变化曲线与实测结果基本相同, 但峰值较大.

### 2.2.2 夏玉米水汽通量的动态模拟

涡度相关的连续观测值表明, 夏玉米水汽通量有明显的日变化, 最大值一般出现在中午 12:00~14:00 之间, 早晨及傍晚较小. 就每 30 min 通量的

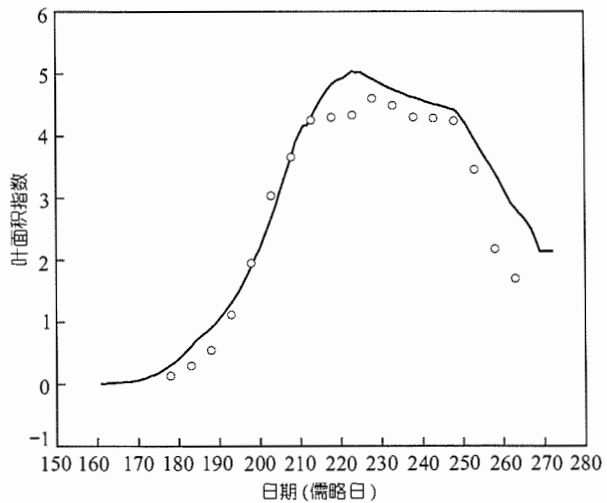


图 8 模拟与实测的夏玉米 LAI 动态变化

观测数据来看,  $LE$  的最大值可达  $486.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 相当于  $0.58 \text{ mm} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{h}^{-1}$ . 日平均  $LE$  的最大值为  $242.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 出现在 8 月 10 日(DOY222), 此时叶面积指数达 5.9, 正值玉米抽雄期, 生长旺盛, 耗水量大. 整个玉米生长季累积蒸散量达  $385.3 \text{ mm}$ . 水汽通量年变化主要是由太阳辐射引起的, 还受气温、风速、空气水汽压差、土壤湿度、叶面积指数等的影响.

利用 RZ-SHAW 模型可以模拟夏玉米生长季内水汽通量的日变化, 模型模拟结果与实测值有较好的一致性, 相关系数可达 0.83(图 9). 模拟所得到的整个生长季内累积蒸散量为  $396.2 \text{ mm}$ , 略高于实测值 2.73%, 其变化曲线与实测值相吻合(图 10).

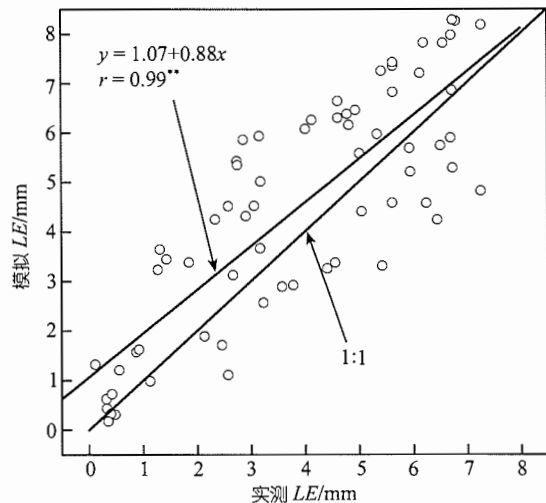


图 9 观测与模拟的夏玉米日水汽通量

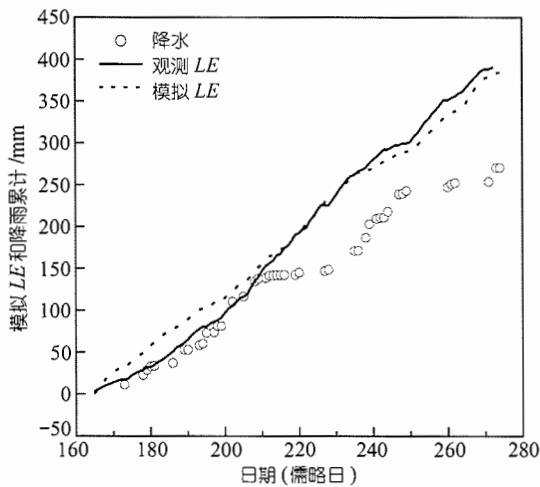


图 10 观测与模拟的夏玉米累积蒸散量

2.2.3 夏玉米能量平衡各分量的日变化及模拟

在夏玉米各主要生育阶段内选择典型晴天, 分析能量各分量的日变化的特点. 图 11 分别代表了 7 月 4 日(DOY185)、7 月 29 日(DOY210)、8 月 20 日(DOY232)和 9 月 16 日(DOY259)实测及 RZ-SH 模型模拟所得到的夏玉米能量平衡各分量的日变化. 可

以看出, 在各生育阶段,  $LE$  与  $R_n$  的变化具有很好的 consistency, 呈现日出后迅速增加, 至中午 12:00~13:00 左右达到最大值后开始下降;  $H_s$  与  $G$  相对较小, 变化均较缓慢. RZ-SH 模型模拟的结果与实测值较好地吻合.

以玉米灌浆期(8 月中旬)内连续 6 日(DOY235-240)为例, 利用 RZ/SHAW 模型对冠层进行 24 h 水汽通量的模拟, 同时采用  $RMSE$ (均方误)、 $MSEs$ (系统平均方差)和  $I_A$ (一致性指数)来评价模型在阴天或晴天条件下模拟的结果.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}, \quad (15)$$

$$MSEs = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - \bar{x}_i)^2}{n}, \quad (16)$$

$$I_A = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n [|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|]^2}, \quad (17)$$

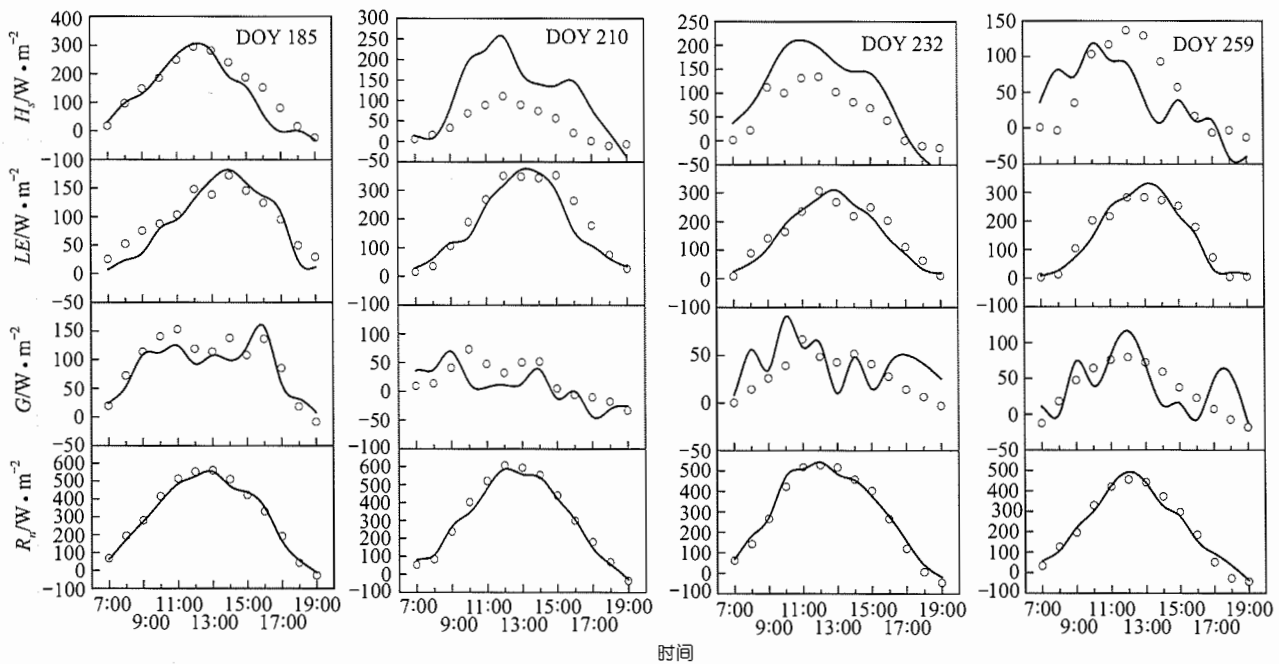


图 11 夏玉米不同生育阶段典型晴天  $R_n$ ,  $G$ ,  $LE$  和  $H_s$  的日变化  
圈为实测; 线型为模拟

其中  $y_i$  表示观测的第  $i$  个值,  $x_i$  表示模拟的第  $i$  个值;  $\bar{y}_i$  表示线性回归拟合后得到的第  $i$  个值,  $\bar{x}$  是模拟值的平均. 表 1 中得到的一致性指数均在 0.75 以上,  $RMSE$  在 1.0 以下, 说明 RZ-SHAW 模型模拟的逐时潜热通量与相应时段内涡度相关实测值有较好的一致性.

表 1 RZ-SHAW 模拟的逐时水汽通量与实测值之间的统计分析

8月	17	18	19	20	21	22
$RMSE$	0.85	0.69	0.80	0.74	0.83	0.79
$MSEs$	32.60	37.30	42.50	40.30	28.70	38.10
$I_A$	0.81	0.77	0.79	0.79	0.85	0.77

就  $LE$  与  $G$  的季节变化趋势而言, RZ-SHAW 模型模拟结果与实测结果是一致的, 除了在作物的成熟期, 其它各生育期内模型模拟得到的  $LE/R_n$  均比实测值略大, 最高值达 65.37%,  $LE$  与系统可供能量的比值达 70.24%, 均出现在灌浆期. 相应地, 土壤热通量占  $R_n$  的比例在 6.94%~22.64% 之间. 逐日对比发现, 在空气水汽饱和和差高、平流较强的天气, 日总蒸散量的模拟值和实测值出现较大偏差.

### 3 结论和讨论

夏玉米水汽通量与净辐射的比值 ( $LE/R_n$ ) 随季节呈上升趋势, 在灌浆期间这一比例高达 60% 左右, 进入成熟期这一比例值略有下降. 除了在作物的成熟期, 其它各生育期内模型模拟得到的  $LE/R_n$  均比实测值略大, 最高值均出现在灌浆期.

RZ-SHAW 模型模拟的夏玉米能量平衡各分量具有与实测值较为一致的日变化曲线. 其中模拟得到的逐时水汽通量与相应时段内涡度相关实测值的一致性指数 ( $I_A$ ) 均在 0.75 以上, 均方差 ( $RMSE$ ) 在  $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  以下.

图 2 所示是整个玉米生长季的能量平衡,  $H_s + LE$  与可供能量之比为 0.84, 因为夜间大气较稳定, 湍流交换弱, 测量误差较大, 造成了能量不平衡, 但是白天  $H_s + LE$  与可供能量之间相差不大, 这对结果影响不大.

本文对夏玉米生长期间水汽通量的日变化与季节变化规律进行了分析, 并利用涡度相关的观测数

据对 RZ-SHAW 模型以日或时为步长, 模拟作物冠层水、热的功能进行了验证. 在水分供应充足的条件下, 夏玉米水汽通量具有明显的日变化, 最大值一般出现在中午 12:00~14:00 之间, 早晨及傍晚较小. RZ-SHAW 模型模拟得到的夏玉米日蒸散量与实测值的相关系数可达 0.83, 整个生长季内累积蒸散量为 396.2 mm, 略高于实测值 2.73%, 两者的变化趋势是一致的.

致谢 美国农业部的 Gerald N. Flerchinger 先生为本文提供了许多相关研究文献及热忱的帮助, Dafeng Hui 先生对涡度相关数据的处理提出了建议; 此外, Peter Anthoni 和 Beverly E., Law 先生对本文写作中出现的问题提出了意见与建议, 在此一并表示衷心的感谢.

### 参 考 文 献

- 1 Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13: 125~153
- 2 Baldocchi D-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
- 3 Monteith J-E. Evaporation and Environment. *Symp Soc Expl Biol*, 1965, 19: 205~234
- 4 Noilham J, Planton S-A. Simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 536~5493
- 5 Deardoff J W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J Geophys Res*, 1978, 83: 1889~1903
- 6 Sellers P-J, Sud Y-C, Dalche R A. A simple biosphere model SiB for use within general circulation models. *J AtmosSci*, 1986, 43: 505~5315
- 7 Ace E, Mihailovic D-T. A coupled soil moisture and surface temperature prediction model. *J Appl Meteor*, 1991, 30: 812~822
- 8 Oltechev A, Constantin G, Gravenhorst A, et al. Application of a six-lay SVAT model from simulation of evapotranspiration and water uptake in a sparse forest. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1996, 21(3): 195~199
- 9 Kustas W-P. On using mixed-layer transport parameterizations with radiometric surface temperature for computing regional scale sensible heat flux. *Boundary-layer Meteorol*, 1996, 80(3): 205~211
- 10 Kim C-P. Impact of soil heterogeneity in a mixed-layer mode lof the planetary boundary layer. *Hydrologicaal Sciences Journal*, 1998, 43(4): 633~658
- 11 Flerchinger G-N, Hanson C-L, Wight J-R. Modeling of evapotranspiration and surface energy budgets across awatershed.

- Water Resour Res, 1996, 32(8): 2539~2548
- 12 USDA-ARS, Root zone water quality model.RZWQM98. GPSR Technical Report No. 3. USDA-ARS Great Plains Systems Research Unit, Ft. Collins, CO, 1998
  - 13 Flerchinger G-N, Cooley K-R, Deng Y. Impacts of spatially and temporally varying snowmelt on subsurface flow in a mountainous watershed, 1. Snowmelt simulation. *Hydrol Sci J*, 1994, 39: 507~520
  - 14 Flerchinger G-N, Cooley K-R, Hanson C L, et al. A uniform versus an aggregated water balance of a semi-arid watershed. *Hydrol Proc*, 1998a, 12: 331~342
  - 15 Flerchinger G-N, Hanson C-L, Wight J-R. Modeling of evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed. *Water Resour Res*, 1996b, 32(8): 2539~2548
  - 16 Flerchinger G-N, Kustas W-P, Weltz M-A. Simulating surface energy fluxes and radiometric surface temperatures for two arid vegetation communities using the SHAW model. *J Appl Meteorol*, 1998b, 37(5): 449~460
  - 17 Flerchinger G-N, Aiken R-M, Rojas K-W, et al. Development of the root zone water quality model (RZWQM) for over- winter conditions. *American society of Agricultural Engineers*, 1999, 43(1): 59~68
  - 18 Falge E, Baldocchi D, Olson R. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agri Forest Meteorol*, 2001a, 107: 43~69
  - 19 Black T-A, Ethier G-J, Dewitt G-B. Annual and seasonal variability of sensible and latent heat fluxes above a coastal Douglas-fir forest, British Columbia, Canada. *E.R. Humphreys. Agri Forest Meteorol*, 2003, 115: 109~125
  - 20 Wilson K B, Baldocchi D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agri Forest Meteorol*, 2000, 100: 1~18
  - 21 Peter M, Freibauer A-A, Kolle O. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany. *Agri Forest Meteorol*, 2004, 121: 55~67
  - 22 Snane M-H, Gregoryanf J-M, McCarty T-R. Water use prediction for residue management systems. *ASAE. St. Joseph, MI. Paper* 1984, No. 84~2016
  - 23 DeCoursey D-G. Evaporation and transpiration processes. In: *Root Zone Water Quality Model (version 1.0), Technical Documentation*. Fort Collins, CO, 1992. 29~74
  - 24 Flerchinger G-N, Pierson F-B. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agric. and Forest Meteorol*, 1991, 56: 227~246
  - 25 Campbell G S. *Soil Physics with BASIC: Transport models for soil-plant systems*. Elsevier, Amsterdam, 1985. 150
  - 26 Aiken R M, Flerchinger G N, Johnsen K A. Simulating surface soil and residue temperatures with incomplete cover. *Agron J*, 1997a, 89(3): 405~416
  - 27 张永强, 沈彦俊, 刘昌明, 等. 华北平原典型农田水、热与 CO<sub>2</sub> 通量的测定. *地理学报*, 2002, 57: 333~342