

DOI: 10.5846/stxb201810272317

于文颖, 纪瑞鹏, 贾庆宇, 冯锐, 武晋雯, 张玉书. 基于改进的双作物系数法估算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量. 生态学报, 2020, 40(1): 325-335.

Yu W Y, Ji R P, Jia Q Y, Feng R, Wu J W, Zhang Y S. Evapotranspiration estimation of *Phragmites australis* wetland in the Liaohe River Delta based on the improved dual crop coefficient method. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 325-335.

# 基于改进的双作物系数法估算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量

于文颖<sup>1,2</sup>, 纪瑞鹏<sup>1,2,\*</sup>, 贾庆宇<sup>1,2</sup>, 冯锐<sup>1,2</sup>, 武晋雯<sup>1,2</sup>, 张玉书<sup>1,2</sup>

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2 辽宁省农业气象灾害重点实验室, 沈阳 110166

**摘要:**以辽河三角洲湿地芦苇群落为研究对象,利用涡动相关通量、小气候梯度要素、群落内水面蒸发量以及芦苇群落生长参数等数据,基于 FAO-56 模型的双作物系数法,分别计算作物系数  $K_c$ 、基础作物系数  $K_{cb}$  和水面蒸发系数  $K_w$ ,分析其日变化动态及主导影响因子,建立基于生物因子和环境因子的小时尺度双作物系数模型。结果如下:(1) 芦苇生长初期, $K_c$  和  $K_{cb}$  的日变化呈现早晚高、中午略低的多峰波动曲线;在快速生长期和稳定生长期, $K_c$  和  $K_{cb}$  白天波动幅度较小,早晚波动幅度较大;生长末期, $K_c$  和  $K_{cb}$  夜晚波动幅度较大,白天呈现多峰波动曲线; $K_w$  白天较小、夜晚较高,生长初期白天的数值显著高于其他时期。(2) 相关分析表明,气温、相对湿度、风速、株高和叶面积指数是  $K_c$ 、 $K_{cb}$  和  $K_w$  的影响因子;基于生物因子和环境因子重新构建双作物系数模型,基于改进的双作物系数法模拟芦苇群落蒸散,决定系数  $R^2$  达 0.894。(3) 利用改进的双作物系数模型和 FAO-56 模型,对辽河三角洲芦苇群落的蒸发与蒸腾过程进行模拟,实现芦苇群落蒸发过程与蒸腾过程的分离,解决了实际观测无法直接获取芦苇群落蒸腾量的问题,同时提高了芦苇群落蒸散的模拟精度。(4) 调整了 FAO 推荐的芦苇单作物系数常数值,调整后的作物系数更适用于辽河三角洲芦苇湿地。

**关键词:** 芦苇; 湿地; 蒸散量; 双作物系数; 模拟

## Evapotranspiration estimation of *Phragmites australis* wetland in the Liaohe River Delta based on the improved dual crop coefficient method

YU Wenying<sup>1,2</sup>, JI Ruipeng<sup>1,2,\*</sup>, JIA Qingyu<sup>1,2</sup>, FENG Rui<sup>1,2</sup>, WU Jinwen<sup>1,2</sup>, ZHANG Yushu<sup>1,2</sup>

1 Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China

2 Key Laboratory of Agrometeorological Disasters, Liaoning Province, Shenyang 110166, China

**Abstract:** *Phragmites australis* wetland in the Liaohe River Delta of Northeastern China was selected as a research object. Based on the dual crop coefficient of FAO-56 model and the observed data (including flux data, microclimate gradient data, water evaporation, growth parameters of *P. australis*, etc.) in Panjin Wetland Ecosystem Research Station, the crop coefficient ( $K_c$ ), the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ), and the water evaporation coefficient ( $K_w$ ) were calculated. The diurnal dynamics of three coefficients and their influencing factors were analyzed. Dual crop coefficient model at hour scale was established using the biological factors and environmental factors. The results are as follows: (1) In the initial growth stage, the diurnal variation of  $K_c$  and  $K_{cb}$  showed multi-peak fluctuation with higher values in the morning and evening and lower values at noon; during the rapid development and stable stage, the fluctuation ranges of  $K_c$  and  $K_{cb}$  were smaller in the

**基金项目:**国家自然科学基金青年基金项目(41405109);辽宁省科技厅重点研发计划指导计划项目(2018108004);中国气象局气候变化专项(CCSF201819)

**收稿日期:**2018-10-27; **网络出版日期:**2019-10-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiruipeg@163.com

daytime and larger at night; at the end of growth season,  $K_c$  and  $K_{cb}$  fluctuated greatly at night and presented multi-peak curves in the daytime.  $K_w$  was smaller in the daytime and higher at night, with the daytime values in the initial stage higher than those of the other stages. (2) The correlation analysis showed that the influencing factors of  $K_c$ ,  $K_{cb}$ , and  $K_w$  were air temperature, relative humidity, wind speed, plant height, and leaf area index. The dual coefficient model was reconstructed with the biological and environmental factors. Thus, the simulation of the evapotranspiration in *P. australis* wetland was improved with the determination coefficient  $R^2$  reaching 0.894. (3) Using the improved dual crop coefficient model and FAO-56 model, the evaporation and transpiration of *P. australis* wetland in the Liaohe River Delta were simulated. This could solve the problem that transpiration is unobtainable from direct observation and improve the accuracy of evapotranspiration simulation. (4) We adjusted the constant value of *P. australis* crop coefficient recommended by FAO which was more suitable for the Liaohe River Delta wetland.

**Key Words:** *Phragmites australis*; wetland; evapotranspiration; dual crop coefficient; simulation

蒸散过程是陆地水文循环的重要组成部分,估算蒸散量对理解土壤-植物-大气连续体(SPAC, Soil-Plant-Atmosphere Continuum)系统中的水分平衡和水分传输具有重要意义<sup>[1]</sup>。蒸散(ET, Evapotranspiration)的两个组分蒸发(E, Evaporation)和蒸腾(T, Transpiration)分别反映了水分从土壤和植物向大气传输时的非生物过程和生物过程<sup>[2]</sup>, ET组分的拆分能更明晰不同水源对生态水文过程的贡献<sup>[3]</sup>, 目前对于不同生态系统 ET 每个组分的重要性仍未达成共识<sup>[4]</sup>。未来气候变化将显著影响和改变全球水循环过程,蒸散过程及其组分的拆分是理解碳水循环变化的关键,准确估算各组分可以深入了解植被对水文过程的影响程度,准确估算蒸散量对于我们理解陆地生态系统至关重要。

蒸散是湿地水分支出的主要途径,湿地蒸散量组分的拆分,对于了解湿地的水文过程和湿地蒸散过程对区域水循环的贡献等方面有着重要意义<sup>[5]</sup>。目前,湿地蒸散量的监测方法主要有蒸发皿法、同位素法、大孔径闪烁仪法、涡动相关法以及遥感法等,其中,涡动相关法被公认为精度较高的观测方法,获取的数据可用于模型估算的校正。湿地蒸散量模型估算法主要有: Thornthwaite 公式、Penman 模型、Penman-Monteith 模型、FAO-56 模型、Hammer-Kadle 经验方程、Priestly-Taylor 模型、波文比能量平衡法等,其中 FAO Penman-Monteith 公式被认为是目前计算参考作物蒸散量的标准方法<sup>[6]</sup>。湿地蒸散量通常利用参考作物蒸散量和作物系数来估算,该方法的关键是确定作物系数。作物系数的计算方法包括单作物系数法和双作物系数法,单作物系数把植被蒸腾和土壤蒸发作为一个整体来考虑,适合于均一完全覆盖植被,双作物系数将土壤蒸发系数和植被蒸腾系数区分开,反映了植被表面蒸散过程机理<sup>[7]</sup>。

国际粮农组织(FAO, Food and Agriculture Organization)规定了各时期典型作物系数的经验常数<sup>[8]</sup>。研究表明,作物系数受生物因子和环境因子的共同影响,主要包括植被的高度、覆盖度、叶面积指数、地表湿度、生长季节、地理位置、气候和环境因子等<sup>[9-11]</sup>。为了选择适用于不同类型湿地植被的作物系数以准确地评估湿地蒸散量,国内外学者对 FAO 推荐的作物系数进行了修正。贾志军等<sup>[12]</sup>利用线性方程修正了 FAO 推荐的 3 个发育期作物系数,并计算了三江平原毛苔草沼泽湿地蒸散量;周林飞等<sup>[13]</sup>根据环境因子的变化将 FAO 推荐作物系数调整为 4 个发育期的作物系数,并估算了石佛寺人工芦苇湿地的蒸散量。Zhou 等<sup>[14]</sup>利用空气温度、相对湿度和净辐射作为输入参数建立了日尺度作物系数模型,并估算了芦苇湿地蒸散量。

芦苇是湿地生态系统的主要植被类型之一,在我国北方分布广泛<sup>[15]</sup>。湿地蒸散包括湿地水面-土壤-植被表面的蒸发过程、植被蒸腾过程和植被表面截留蒸发过程,对于芦苇湿地,表面截留蒸发量较小,湿地蒸散以水(土)表面蒸发过程和芦苇群落蒸腾过程为主。常用的双源蒸散模型包括 Shuttleworth-Wallace 模型(S-W)和 FAO-56 双作物系数法, S-W 模型计算参数多,相对复杂<sup>[16]</sup>。FAO-56 模型的双作物系数法<sup>[17]</sup>是一个简单易行的方法,但由于不同类型湿地植被双作物系数的缺乏而使得 FAO-56 模型的应用受到限制<sup>[18-19]</sup>。因此,双作物系数的确定是模拟芦苇湿地蒸发与蒸腾过程需要解决的关键问题。

辽河三角洲湿地是亚洲最大的暖温带滨海湿地,其中芦苇面积达到 756km<sup>2</sup>,是亚洲第一大芦苇湿地<sup>[20]</sup>,模拟辽河三角洲芦苇群落的蒸发与蒸腾过程,对于明确芦苇湿地的水面-土壤-植被表面的水分交换、传输过程和平衡关系有着十分重要的意义。本文以辽河三角洲湿地芦苇群落为研究对象,利用涡动相关水汽通量、小气候梯度要素、群落内水面蒸发和芦苇群落生长参数等数据和 FAO-56 模型计算双作物系数,分析作物系数动态变化过程及其主导影响因子,基于生物因子和环境因子建立时间尺度为小时的双作物系数模型,为实现芦苇湿地蒸发与蒸腾过程的分离提供参数,同时可为湿地蒸散量的估算和水资源评估提供依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

辽河三角洲位于 40°45′—41°10′N, 121°30′—122°00′ E,湿地生物类型多样,自然湿地植被主要包括芦苇 (*Phragmites australis*)、碱蓬 (*Suaeda glauca*)、怪柳 (*Tamarix chinensis*)、獐毛 (*Aeluropus sinensis*)、羊草 (*Leymus chinensis*)、罗布麻 (*Apocynum venetum*)、香蒲 (*Typha orientalis*) 等<sup>[21-22]</sup>,其中,芦苇沼泽湿地的面积占辽河三角洲总面积的 20%以上<sup>[21]</sup>。该区域属暖温带大陆性半湿润季风气候,四季分明,雨热同期,年平均气温 8.3℃,年降水量 611.6mm<sup>[23]</sup>。

研究区(图 1)选在中国气象局沈阳大气环境研究所盘锦湿地生态系统野外观测站(40°56′N, 121°57′E)。该站位于辽宁省盘锦市大洼县赵圈河芦苇自然保护区内,保护区内芦苇湿地保存完好,其下垫面代表性较好。芦苇生长季和淹水时间为 4—10 月,芦苇平均高度 2—3m,10 月以后芦苇进入枯萎期<sup>[24]</sup>。

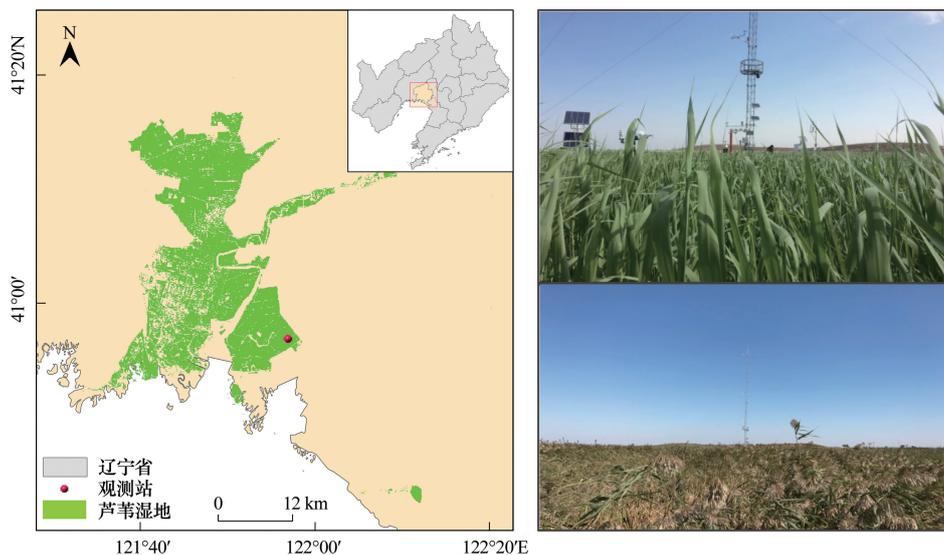


图 1 辽河三角洲芦苇湿地观测站位置及实景图

Fig.1 Locations of the research station and actual scenery in the Liaohe River Delta wetland, China

### 1.2 试验观测及数据处理

芦苇观测场配备有小气候梯度观测系统(CAMS620-GS, Huatron, China)、涡动相关观测系统(Li-cor, Inc, USA)、固态蒸发与降水记录仪(PD210, Huatron, China)等仪器设备。其中涡动相关观测系统传感器安装高度 3m,提供 30min 频率的瞬时通量数据,小气候梯度观测系统提供了 5 个高度(1, 2, 8, 16, 30m) 30min 频率气象数据,包括风速、气温、相对湿度、水汽压等<sup>[25]</sup>。本文数据包括 2016 年芦苇生长季涡动相关系统的潜热通量、感热通量、小气候梯度的气象数据、降水量、水面蒸发量,土壤热通量等数据。在芦苇生长季不同生长阶段,选择天气晴朗日观测冠层叶面积指数和植株高度,并记录发育期。采用 Li-2000 冠层分析仪观测叶面积指数,每次选择芦苇样方 5 个,重复 10 次,取其平均值;每次选择 10 株芦苇,利用量尺测量其高度,

取其平均值。

涡动相关实测数据常用于模型计算或遥感反演蒸散值的精度检验,且广泛应用于各种类型湿地。利用 Eddypro 5.0.1 软件对涡动相关系统获取的通量数据进行坐标旋转、密度效应校正等处理,转化为小时尺度观测频率的潜热通量数据和蒸散量,并进行 QA/AC 奇异值剔除。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 参考作物蒸散量的计算

利用 FAO-56 Penman-Monteith 模型计算参考作物蒸散量,其表达式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中, $ET_0$ 为参考作物蒸散量,mm/d; $R_n$ 为作物表面净辐射, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ; $G$ 为土壤热通量, $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ ; $T$ 为平均气温, $^{\circ}C$ ; $e_s$ 为饱和水汽压,KPa; $e_a$ 为实际水汽压,KPa; $\Delta$ 为饱和水汽压-温度曲线斜率,KPa/ $^{\circ}C$ ; $\gamma$ 为湿度计常数,KPa/ $^{\circ}C$ ; $u_2$ 为距地面 2m 高处风速,m/s。

#### 1.3.2 双作物系数法

FAO-56 模型的双作物系数法将蒸散量分为土壤蒸发和植物蒸腾两部分计算,作物系数是实际蒸散量( $ET_c$ )和参考作物蒸散量( $ET_0$ )的比值,它综合反映了环境因素和植物对蒸散的影响,包括空气动力学阻力、表面阻力、植物品种和植被长势等。

FAO-56 双作物系数法数学表达式为:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中, $ET_c$ 为实际蒸散量, $K_c$ 为作物系数,可分解为如下式:

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (3)$$

式中, $K_{cb}$ 为反映植物蒸腾的基础作物系数; $K_e$ 为土壤表面蒸发的蒸发系数; $K_s$ 为水分胁迫系数,辽河三角洲湿地水分供应充足,故本研究中  $K_s = 1$ 。

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (4)$$

在芦苇生长季(芦苇生长季和淹水时间均为 4—10 月),芦苇根部完全被水淹没,因此,将公式中的土壤表面蒸发系数( $K_e$ )代换为水面蒸发系数  $K_w$ 。

$$K_c = K_{cb} + K_w \quad (5)$$

若已知作物系数的各分量,就可以利用 FAO-56 模型(式 2)计算芦苇湿地的蒸腾量、水(土)面蒸发量以及实际蒸散量。

#### 1.3.3 双作物系数模型改进

将辽河三角洲湿地芦苇发育期划分为 4 个阶段:生长初期、快速生长期、稳定生长期和生长末期。对芦苇不同发育阶段的  $K_c$ 、 $K_{cb}$  和  $K_w$  与生物因子和环境因子进行拟合。首先分析  $K_c$  与冠层叶面积指数 LAI、芦苇高度  $h$  等生物因子及大气温度  $T_a$ 、大气相对湿度 RH 等环境因子的相关关系,找出其主导影响因子,利用主导影响因子重新构建双作物系数模型,对其参数进行拟合。拟构建方程如下:

$$K_c = a \times f(LAI, h) \times f(T_a, RH, \dots) + b \quad (6)$$

安装在芦苇群落中的水面蒸发仪连续监测得到水面蒸发量  $E$ ,利用下式计算实际水面蒸发系数  $K_w$ 。

$$K_w = E/ET_0 \quad (7)$$

将涡动相关数据观测的蒸散量  $ET_c$  作为实际值计算  $K_c$ 。

$$K_c = ET_c/ET_0 \quad (8)$$

已知  $K_c$  和  $K_w$  即可用式(5)计算出  $K_{cb}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 芦苇湿地 $ET_c$ 、 $ET_0$ 和 $E$ 日变化

芦苇群落  $ET_c$  日变化表现为单峰或多峰曲线。晴天条件下,凌晨 0 时—6 时蒸散低,随着气温升高,蒸散量不断升高,到 12 时和 14 时左右出现峰值;而后,随着气温下降,蒸散不断下降,夜间蒸散量下降到最低(图 2)。多云或阴雨天气下,蒸散将呈现多峰曲线变化。基于 FAO-56 Penman-Monteith 模型,利用小气候梯度、通量等数据计算的  $ET_0$  与利用涡动相关系统观测的  $ET_c$  变化趋势基本一致,但芦苇湿地  $ET_c$  在数值上高于  $ET_0$ 。

晴天条件下, $E$  的日变化与  $ET_c$  的日变化趋势基本一致,呈现早晚低、中午高的波动曲线变化(图 2);多云或阴雨天气条件下, $E$  的日变化与  $ET_c$  的日变化略有不同,但同样呈现多峰波动变化。从数值上看, $E$  在芦苇生长初期高于快速生长期、稳定生长期和生长末期。

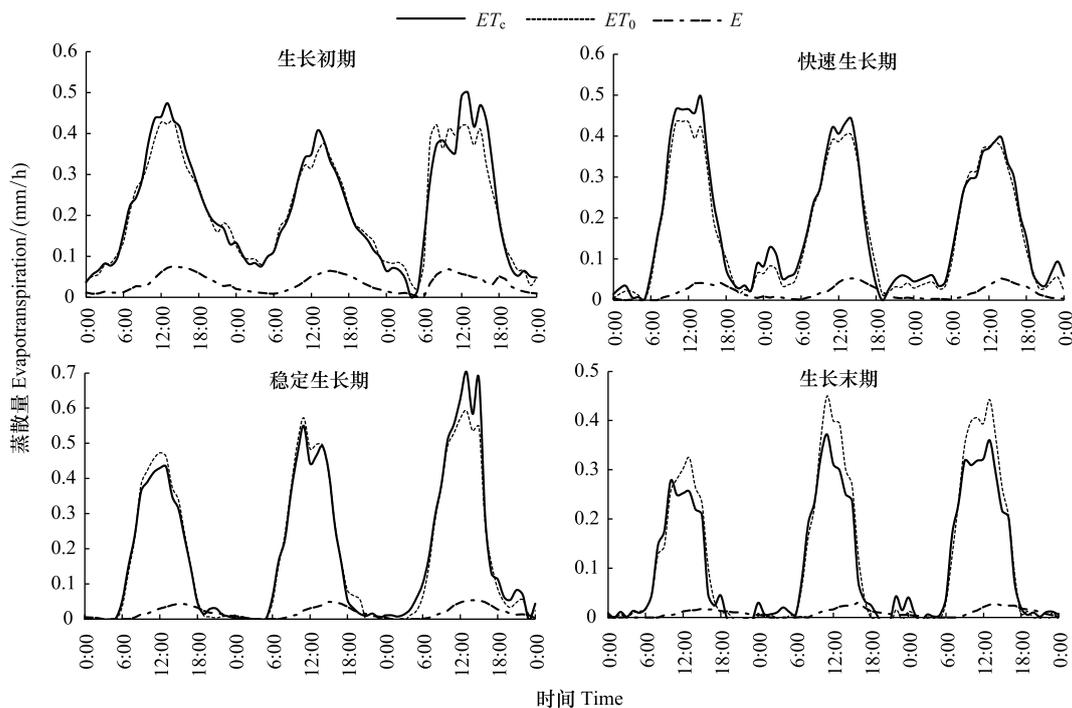


图 2 实际蒸散量  $ET_c$ 、水面蒸发量  $E$  与参考作物蒸散量  $ET_0$  日变化

Fig.2 Daily dynamics of actual evapotranspiration ( $ET_c$ ), water evaporation ( $E$ ) and reference evapotranspiration ( $ET_0$ )

$ET_c$ : 实际蒸散量 Actual evapotranspiration;  $E$ : 水面蒸发量 Water evaporation;  $ET_0$ : 参考作物蒸散量 Reference evapotranspiration

### 2.2 作物系数日动态及其影响主导因子

#### 2.2.1 $K_c$ 、 $K_{cb}$ 和 $K_w$ 日动态

在芦苇生长初期, $K_c$  和  $K_{cb}$  的日动态呈现多峰波动变化,全天波动幅度相对稳定,波动范围在 0.6—1.2 之间,其中白天(7 时—17 时,下同)波动范围较小,在 0.9—1.1 之间;在快速生长期和稳定生长期, $K_c$  和  $K_{cb}$  夜晚波动幅度较大,而白天波动幅度较小,波动范围在 0.9—1.3 之间;生长末期, $K_c$  和  $K_{cb}$  夜晚波动幅度较大,白天呈现多峰波动曲线,波动范围在 0.8—1.2 之间; $K_w$  基本呈现白天低、夜晚高的波动曲线,在快速生长期、稳定生长期和生长末期白天的数值显著低于生长初期(图 3)。

#### 2.2.2 $K_c$ 、 $K_{cb}$ 和 $K_w$ 与生物和气象因子的相关性

基于 2016 年的涡动水汽通量、小气候梯度要素、水面蒸发量等数据,计算芦苇群落小时尺度和日尺度  $K_c$ 、 $K_{cb}$  和  $K_w$ ,并将其与叶面积指数 LAI、株高  $h$ 、气温  $T_a$ 、相对湿度 RH 和风速  $u$  等因子进行相关性分析,结果表明,小时尺度  $K_c$  与  $T_a$ 、LAI、 $h$  显著相关, $K_w$  与 RH 显著相关, $K_{cb}$  与  $T_a$ 、RH、 $u$ 、LAI、 $h$  均显著相关(表 1);日尺

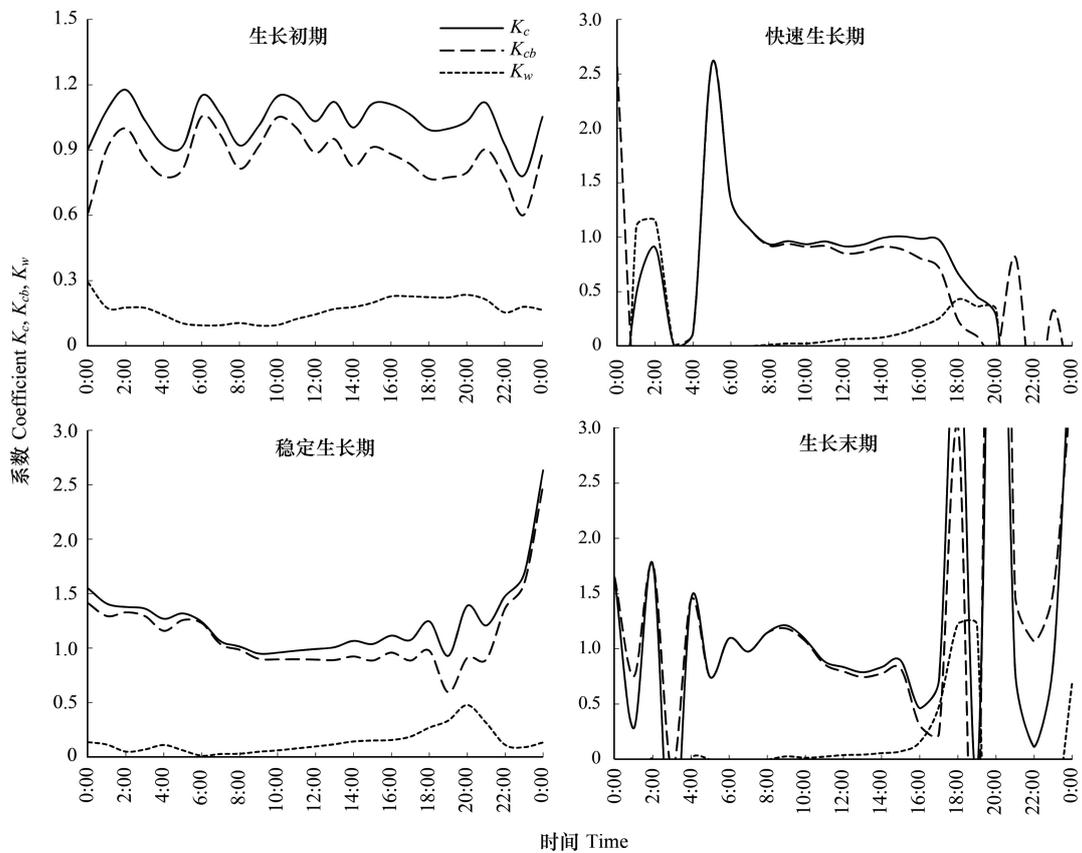


图3 作物系数  $K_c$ 、基础作物系数  $K_{cb}$  和水面蒸发系数  $K_w$  日动态

Fig.3 Daily dynamics of crop coefficient ( $K_c$ ), basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ), and water evaporation coefficient ( $K_w$ )

$K_c$ : 作物系数 Crop coefficient;  $K_{cb}$ : 基础作物系数 Basal crop coefficient;  $K_w$ : 水面蒸发系数 Water evaporation coefficient

度 3 个系数与 LAI、 $h$  显著相关, 与环境因子相关性不显著(表 2)。

为了避免估算小时尺度蒸散量时忽略掉生物因子的作用, 在小时尺度数据相关分析中同样加入了生物因子。基于整个生长季的各要素相关性分析结果, 发现日尺度 3 个系数主要受生物因子的影响, 小时尺度 3 个系数在短期内主要受环境因子影响, 而在较长时间范围(如整个生长季)受生物因子和环境因子的共同影响。

表 1 小时尺度作物系数与生物因子、气象因子的相关关系

Table 1 The relationship between the hourly crop coefficient and biological factors, weather factors

| 作物系数<br>Crop coefficient                      | 叶面积指数 LAI<br>Leaf area index | 株高 $h$<br>Plant height | 气温 $T_a$<br>Temperature | 湿度 RH<br>Relative humidity | 风速 $u$<br>Wind speed |
|---|------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| 作物系数 $K_c$<br>Crop coefficient                | 0.104 **                     | -0.094 **              | -0.072 **               | -0.027                     | -0.032               |
| 水面蒸发系数 $K_w$<br>Water evaporation coefficient | -0.032                       | -0.045                 | 0.044                   | -0.132 **                  | 0.042                |
| 基础作物系数 $K_{cb}$<br>Basal crop coefficient     | 0.134 **                     | -0.079 **              | -0.154 **               | -0.075 **                  | -0.079 **            |

\*  $P < 0.05$  水平显著相关, \*\*  $P < 0.01$  水平显著相关

### 2.3 双作物系数模型构建及检验

基于观测站小时尺度的连续观测数据, 参照 FAO 推荐的单、双作物系数方程, 结合非线性回归法, 建立基础作物系数  $K_{cb}$  和水面蒸发系数  $K_w$  的模型, 方程如下:

$$K_{cb} = [a_1(T_a - 20) + b_1(u - 2) + c_1(RH - 45)] LAI^d + e \quad (9)$$

$$K_w = a_2(RH-45) LAI^{b_2} + c_2 \quad (10)$$

$$K_c = K_{cb} + K_w \quad (11)$$

表 2 日尺度作物系数与生物因子、气象因子的相关关系

Table 2 The relationship between the daily crop coefficient and biological factors, weather factors

| 作物系数<br>Crop coefficient                      | 叶面积指数 LAI<br>Leaf area index | 株高 $h$<br>Plant height | 气温 $T_a$<br>Temperature | 湿度 RH<br>Relative humidity | 风速 $u$<br>Wind speed |
|---|------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------|
| 作物系数 $K_c$<br>Crop coefficient                | 0.280 **                     | -0.255 **              | -0.153                  | -0.040                     | 0.116                |
| 水面蒸发系数 $K_w$<br>Water evaporation coefficient | 0.322 **                     | -0.446 **              | -0.084                  | -0.158                     | 0.163                |
| 基础作物系数 $K_{cb}$<br>Basal crop coefficient     | 0.274 **                     | -0.241 **              | -0.154                  | -0.033                     | 0.112                |

\*  $P < 0.05$  水平显著相关, \*\*  $P < 0.01$  水平显著相关

利用非线性方程回归迭代法估算方程中的参数,参数拟合结果为:

$$a_1 = -0.702, b_1 = -0.651, c_1 = -0.066, d = -2.872, e = 0.979, a_2 = -0.002, b_2 = -0.277, c_2 = 0.138$$

## 2.4 改进的双作物系数法模拟芦苇湿地蒸腾与蒸发过程

利用模拟的作物系数  $K_c$  计算小时尺度的芦苇实际蒸散量,并与涡动相关系统观测的实际蒸散量进行比较,决定系数  $R^2$  达 0.894,模拟效果很好(图 4)。

利用改进的作物系数法不仅可以计算芦苇实际蒸散量,同时也能拆分芦苇蒸腾过程和蒸发过程。分别以生长初期、快速生长期、稳定生长期和生长末期为例,模拟芦苇群落蒸腾和水面蒸发量的日动态变化过程(图 5),其中,水面蒸发量分别占芦苇总蒸散量的 9.0%—16.3%、7.7%—13.1%、7.4%—12.3% 和 11.6%—15.9%。随着芦苇的快速生长,群落对水面的覆盖度越来越高,芦苇蒸散以蒸腾为主,棵间水面蒸发量占总蒸散量的比重越来越小。当芦苇叶面积指数、覆盖度达到最大值后,芦苇开始呈现衰落趋势,总蒸散量也将减少,水面蒸发量所占比重增加。

辽河三角洲湿地芦苇 4 月 20 日左右萌芽,在生长初期蒸散量较低,随着芦苇的快速生长,一般叶面积指数在 7 月份达到最大值,湿地蒸散量也通常在 7 月份达到最大值,9 月之后进入凋萎期,蒸散量随之减少<sup>[26]</sup>(图 6)。研究认为,芦苇覆盖度的增加能够增加湿地下垫面的蒸散量,同时,芦苇群落蒸腾量的增加量将远大于由于芦苇遮荫引起的棵间水(土)面蒸发的减少量<sup>[27]</sup>,这与本研究的结果一致。

## 3 讨论

### 3.1 基于改进的双作物系数与 FAO 推荐作物系数模拟蒸散过程的结果比较

当芦苇生长茂密,芦苇对下垫面覆盖度较高,此时水面蒸发很小,芦苇蒸散主要以冠层蒸腾为主,但在芦苇生长初期,水面裸露较多,水面蒸发无法忽略时,芦苇群落的蒸散过程包括了芦苇冠层蒸腾以及水面蒸发过程。辽河三角洲芦苇湿地的蒸散过程以芦苇蒸腾为主,5 月份的水面蒸发量大于 6—9 月份,而 6—9 月份由于芦苇覆盖度较高,水面蒸发几乎可以忽略不计。在芦苇生长初期,作物系数随着环境因子的变化,日变化也呈现波动过程,因此,单一的作物系数经验常数不适于小时尺度的蒸散模拟计算。在芦苇生长快速和稳定生长期,作物系数受环境因子影响减小,白天的变化呈现较为稳定的过程,在计算白天的蒸散量时,可以采用简

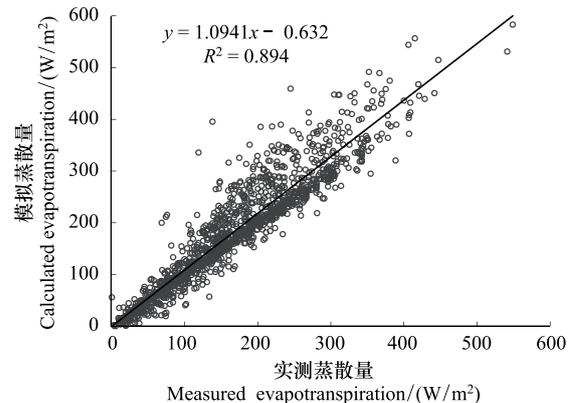


图 4 实测与模拟蒸散量比较

Fig. 4 Comparison of the calculated evapotranspiration and measured values

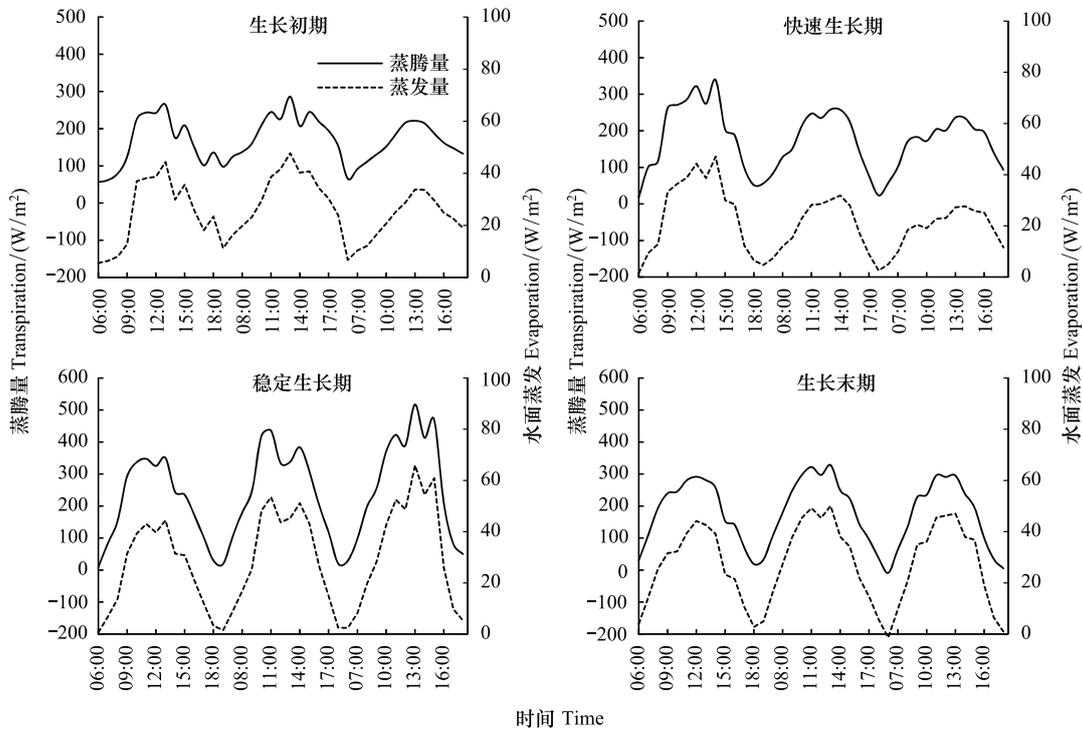


图5 芦苇湿地蒸腾和蒸发过程模拟

Fig.5 The transpiration and evaporation process in reed wetland

化的经验常数。

FAO 推荐的芦苇沼泽湿地(有水层)的作物系数  $K_c$  在生长初期、中期和末期分别为 1.0, 1.2 和 1.0。利用 FAO 推荐的作物系数计算辽河三角洲芦苇湿地蒸散量与涡动相关系统观测的实际蒸散量进行比较, 相关系数  $R^2$  为 0.837(图 7)。以芦苇生长中后期为例, 分别利用 FAO 推荐的作物系数和利用改进的双作物系数法计算芦苇湿地蒸散量(图 8), 基于改进双作物系数法的蒸散量、基于 FAO 推荐作物系数的蒸散量和涡动相关实测值相比, 发现三者的趋势基本一致, 但是利用 FAO 推荐的作物系数计算蒸散量模拟值偏高, 尤其是在芦苇生长中期和后期; 而利用改进的双作物系数法计算的结果与实测值比较接近。利用 FAO 推荐的作物系数模拟值偏高的原因可能是辽河三角洲湿地的芦苇群落与 FAO 推荐的芦苇沼泽生长环境和生态类型不同所引起的差异, 另外单一的作物系数无法完全代表芦苇长势与环境的变化。

由于地区和品种等差异, 直接采用 FAO 推荐的各类作物系数估算蒸散量可能产生较大误差<sup>[28]</sup>, 研究普遍认为, 植被群落的作物系数需要根据当地天气、植被特点、土壤特性以及其他因素进行修正<sup>[29]</sup>。因此, 一些学者考虑了地理因素和气候特点等因素对 FAO 推荐的双作物系数法进行了修正。Wright<sup>[30]</sup> 根据当地气候环境特点修正 FAO 推荐的作物系数; Rosa 等<sup>[10,31]</sup> 基于双作物系数法开发了 SIMdualKc 模型; Paredes 等<sup>[32]</sup> 利用修正后的作物系数校准 SIMdualKc 模型用于豌豆蒸散过程模拟; 彭世彰等<sup>[33]</sup> 修订了冬小麦、夏玉米、棉花及水稻作物的作物系数和土壤蒸发系数公式; 张强等<sup>[34]</sup> 针对春小麦利用风速和相对湿度修正了 Kumar 的作物系数方程; 李谦等<sup>[35]</sup> 等参照当地气候条件和作物叶面积指数订正稻田作物系数。冯禹等<sup>[36]</sup> 基于叶面积指数修正了双作物系数中的土壤蒸发系数, 用于估算春玉米蒸散。

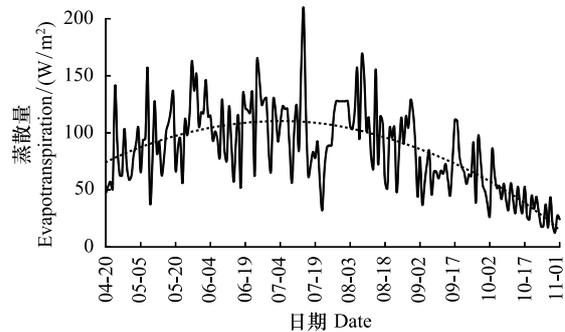


图6 芦苇湿地蒸散量日变化

Fig.6 Diurnal variation of evapotranspiration in reed wetland

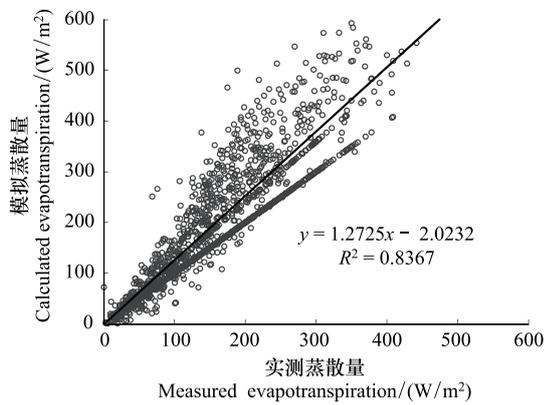


图 7 实测与 FAO 法模拟蒸散量比较

Fig. 7 Comparison of the calculated evapotranspiration used FAO method and measured values

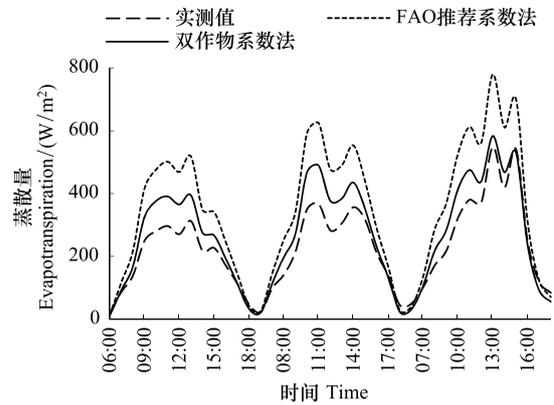


图 8 实测与模拟蒸散量比较

Fig. 8 Comparison of the calculated evapotranspiration and measured values

基于 FAO 公式改进双作物系数法和利用双作物系数法估算农田、森林等生态系统蒸腾和蒸发量的研究较多,但以湿地植被为研究对象的较少。芦苇群落在生长季的覆盖度较高,水(土)面蒸发系数虽然在一定范围内可以忽略,但是通过对作物系数法的改进,发现利用改进后的双作物系数法估算湿地蒸散量比 FAO 推荐系数法更为准确,因此,所构建的双作物系数模型更适用于辽河三角洲湿地的芦苇群落,同时还可以拆分芦苇湿地的蒸发与蒸腾量。

3.2 调整 FAO 推荐的单作物系数经验值简化芦苇湿地蒸散模拟过程

改进的双作物系数法是基于环境因子和生物因子的小时尺度动态作物系数,能够更有效地模拟芦苇群落蒸发与蒸腾过程。但在实际应用中,如果仅计算群落蒸散量,可以利用改进的单作物系数简化计算。将芦苇生长季划分为生长初期、快速生长期、稳定生长期和生长末期 4 个阶段。利用公式(7)计算  $K_c$  实际值,将各个时期每日的动态系数求取平均值,4 个阶段的作物系数平均值分别为 0.9, 1.1, 1.0, 0.9(表 3)。

表 3 辽河三角洲芦苇群落各时期调整作物系数

Table 3 Adjusted crop coefficients at each stage of reed community in Liaohe River Delta

| 发育阶段<br>Growth stages        | 生长初期<br>Initial season | 快速生长期<br>Rapid development season | 稳定生长期<br>Stable season | 生长末期<br>Late season |
|------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------|
| 作物系数 $K_c$ Crop coefficients | 0.9                    | 1.1                               | 1.0                    | 0.9                 |

表 4 给出了 FAO 推荐的不同时期芦苇湿地作物系数经验值,以及其他文献修正后的芦苇湿地作物系数计算值。从表中可以发现,4 个阶段芦苇湿地作物系数变化趋势基本一致,随着芦苇的生长,  $K_c$  值不断增加,并在成熟后下降。芦苇群落植被的高度、密度、覆盖度以及环境因子均影响着作物系数的大小。

作物系数受气候条件和下垫面特征等因素的影响<sup>[39]</sup>,不同品种湿地植被的作物系数不尽相同。Drexler 等<sup>[19]</sup>计算华金三角洲沼泽湿地芦苇的作物系数日均值为 0.7—1.2,生长季平均值为 0.95;Zhou 等<sup>[14]</sup>计算的芦苇湿地作物系数范围为 0.2—1.4,生长季平均值为 0.71;Borin 等<sup>[40]</sup>计算威尼斯和西西里岛芦苇湿地的作物系数范围分别为 4.7—8.4 和 2.3—8.5;Anda 等<sup>[40]</sup>计算巴拉顿湖芦苇湿地 4—9 月份作物系数分别为 1.03, 1.23, 1.4, 1.51, 0.99, 0.77,作物系数的季节平均值为 0.73—1.37。Tuttolomondo 等<sup>[41]</sup>计算西西里岛人工湿地植物伞竹在生长初期、快速生长期、稳定生长期和生长末期的作物系数分别为 1.05, 3.39, 5.71, 2.55,香蒲的作物系数分别为 1.2, 3.84, 6.51, 2.95。Queluz 等<sup>[42]</sup>计算人工湿地香蒲的作物系数月平均范围为 2.03—3.68。王昊等<sup>[38]</sup>利用 FAO-56 模型和单作物系数法计算了扎龙芦苇湿地的蒸散量,在计算中调整了扎龙湿地芦苇各

生长时期的作物系数,其生长初期、快速生长期、稳定生长期和生长末期的作物系数分别为 1.2, 1.191, 1.178 和 1.083,与本文相比,各时期作物系数均略高于辽河三角洲芦苇湿地。贾志军等<sup>[6]</sup>研究认为三江平原沼泽湿地(主要植被毛苔草)的作物系数主要受叶面积指数 LAI 的影响,利用 LAI 建立了作物系数线性回归方程。本文的芦苇群落除了受自身株高、叶面积的影响外,由于研究区地处滨海地区,风速较大,风速是影响作物系数日变化的主导影响因子之一,因此作物系数方程的输入因子包括风速。周林飞等<sup>[13]</sup>根据 FAO 推荐的作物系数调整了石佛寺人工芦苇湿地的作物系数,调整后的生长初期作物系数为 1.2,快速生长期为 1.204,稳定生长期和生长末期加入风速、湿度和株高的影响因子,作物系数为变化值。邓雯等<sup>[43]</sup>认为采用 FAO-56 推荐的单作物系数法计算滇池外海环湖湿地植被年蒸散量是合理的。李志威等<sup>[44]</sup>对若尔盖高原泥炭湿地植被初期、中期和末期修正后的作物系数分别为 0.68, 1.1, 0.62,作物系数小于辽河三角洲芦苇湿地。

表 4 FAO 和其他研究的芦苇湿地作物系数( $K_c$ )比较

Table 4 Comparison of crop coefficients ( $K_c$ ) of FAO and other studies for wetland plants

| 出处<br>Source  | 生长初期<br>Initial season | 快速生长期<br>Rapid development<br>season | 稳定生长期<br>Stable season | 生长末期<br>Late season | 适用地区<br>Suitable area |
|---------------|------------------------|--------------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------|
| 本文 This paper | 0.9                    | 1.1                                  | 1.0                    | 0.9                 | 辽河三角洲芦苇湿地             |
| FAO           | 1.0                    | 1.2                                  | 1.2                    | 1.0                 | 芦苇沼泽(有水层)             |
| FAO           | 0.9                    | 1.2                                  | 1.2                    | 0.7                 | 芦苇沼泽(无水层)             |
| [13]          | 1.15—1.2               | 1.17—1.19                            | 1.17—1.19              | 0.98—1.04           | 石佛寺人工芦苇湿地             |
| [37]          | 1.03                   | 1.23—1.51                            | 0.99                   | 0.77                | 巴拉顿湖芦苇湿地              |
| [38]          | 1.2                    | 1.191                                | 1.178                  | 1.083               | 扎龙芦苇湿地                |

FAO: 国际粮农组织 Food and Agriculture Organization

#### 4 结论

基于涡动通量、小气候梯度要素、水面蒸发等数据和作物系数的影响主导因子(气温、相对湿度、风速、叶面积指数),对辽河三角洲湿地芦苇群落的作物系数  $K_c$ 、基础作物系数  $K_{cb}$  和水面蒸发系数  $K_w$  进行模拟,利用构建的双作物系数模型和 FAO-56 模型,对辽河三角洲芦苇群落冠层尺度的蒸发与蒸腾过程进行模拟。基于生物因子和环境因子建立的动态双作物系数模型,适用于小时尺度的芦苇群落蒸散模拟,同时,实现了芦苇群落蒸发过程与蒸腾过程的分离,解决了无法通过实际观测直接获取芦苇群落蒸腾量的问题,芦苇群落蒸散量的模拟精度提高了 5.7%,可为开展芦苇群落蒸发与蒸腾过程模拟提供参数。同时,调整了 FAO 推荐的芦苇单作物系数经验常数值,新调整的单作物系数更适用于辽河三角洲湿地芦苇群落的蒸散模拟。

#### 参考文献 (References):

- [1] 于文颖,周广胜,周莉. 盘锦湿地芦苇群落蒸散发模拟研究. 气象与环境学报, 2006, 22(4): 47-52.
- [2] Yang Y T, Long D, Guan H D, Liang W, Simmons C, Batelaan O. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: revisit of model physics. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3145-3165.
- [3] Wei Z W, Yoshimura K, Okazaki A, Kim W, Liu Z F, Yokoi M. Partitioning of evapotranspiration using high-frequency water vapor isotopic measurement over a rice paddy field. Water Resources Research, 2015, 51(5): 3716-3729.
- [4] Méndez-Barroso L A, Vivoni E R, Robles-Morua A, Mascaro G, Yépez E A, Rodríguez J C, Watts C J, Garatuza-Payún J, Saíz-Hernández J A. A modeling approach reveals differences in evapotranspiration and its partitioning in two semiarid ecosystems in Northwest Mexico. Water Resources Research, 2014, 50(4): 3229-3252.
- [5] Zhang S C, Zhang J, Liu B, Zhang W G, Gong C, Jiang M, Lv X G. Evapotranspiration partitioning using a simple isotope-based model in a semiarid marsh wetland in northeastern China. Hydrological Processes, 2018, 32(4): 493-506.
- [6] 贾志军,韩琳,王鸽,张通顺. 三江平原典型下垫面 FAO Penman-Monteith 模型适用性分析. 应用生态学报, 2014, 25(5): 1327-1334.
- [7] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,武晋雯,赵先丽,张玉书. 芦苇湿地多时空尺度蒸散模拟研究进展. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1388-1394.
- [8] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome: FAO, 1998.

- [ 9 ] Kumar R, Jat M K, Shankar V. Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration—a review. *Water Science & Technology*, 2012, 66(3): 525-535.
- [ 10 ] Rosa R D, Paredes P, Rodrigues G C, Alves I, Fernando R M, Pereira L S, Allen R G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 2012, 103: 8-24.
- [ 11 ] Paço T A, Ferreira M I, Rosa R D, Paredes P, Rodrigues G C, Conceição N, Pacheco C A, Pereira L S. The dual crop coefficient approach using a density factor to simulate the evapotranspiration of a peach orchard: SIMDualKc model versus eddy covariance measurements. *Irrigation Science*, 2012, 30(2): 115-126.
- [ 12 ] 贾志军, 姬兴杰. 三江平原毛苔草沼泽蒸散量模拟研究. *湿地科学*, 2014, 12(4): 409-418.
- [ 13 ] 周林飞, 高宇龙, 高云彪, 成遣. 基于生育期划分的芦苇蒸散量气候学计算与分析. *沈阳农业大学学报*, 2015, 46(2): 204-212.
- [ 14 ] Zhou L, Zhou G S. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2009, 372(1/4): 41-47.
- [ 15 ] 梁建平, 马大喜, 毛德华, 王宗明. 双台河口国际重要湿地芦苇地上生物量遥感估算. *国土资源遥感*, 2016, 28(3): 60-66.
- [ 16 ] 文治强, 杨健, 尚松浩. 基于双作物系数法的干旱区覆膜农田耗水及水量平衡分析. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 138-147.
- [ 17 ] Allen R G, Pereira L S, Smith M, Raes D, Wright J L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(1): 2-13.
- [ 18 ] Fermor P M, Hedges P D, Gilbert J C, Gowing D J G. Reedbed evapotranspiration rates in England. *Hydrological Processes*, 2001, 15(4): 621-631.
- [ 19 ] Drexler J Z, Anderson F E, Snyder R L. Evapotranspiration rates and crop coefficients for a restored marsh in the Sacramento-San Joaquin Delta, California, USA. *Hydrological Processes*, 2008, 22(6): 725-735.
- [ 20 ] 陈吉龙, 李国胜, 廖华军, 王炳亮, 崔林林. 辽河三角洲河口湿地典型芦苇群落最大光能转化率模拟. *生态学报*, 2017, 37(7): 2263-2273.
- [ 21 ] 张绪良, 张朝晖. 环渤海三角洲滨海湿地的植被特征及演化. 北京: 科学技术文献出版社, 2014.
- [ 22 ] 国家林业局组织. 中国湿地资源-辽宁卷. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [ 23 ] 王炳亮, 李国胜. 1961—2010年辽河三角洲参考蒸散发变化特征及主导因子分析. *地理科学*, 2014, 34(10): 1233-1238.
- [ 24 ] 贾庆宇, 于文颖, 谢艳兵, 梁成华, 吕国红, 王笑影, 温日红, 刘晶森. 芦苇湿地与玉米旱地近地层小气候特征对比. *气象与环境学报*, 2016, 32(6): 148-154.
- [ 25 ] Jia Q Y, Yu W Y, Zhou L, Liang C H. Atmospheric and surface-condition effects on CO<sub>2</sub> exchange in the Liaohe Delta Wetland, China. *Water*, 2017, 9(10): 806.
- [ 26 ] 于文颖, 周广胜, 迟道才, 周莉, 何奇瑾. 盘锦湿地芦苇 (*Phragmites communis*) 群落蒸散发主导影响因子. *生态学报*, 2008, 28(9): 4594-4601.
- [ 27 ] 张颖, 郑西来, 伍成成, 张淑慧. 辽河口芦苇湿地蒸散试验研究. *水科学进展*, 2011, 22(3): 351-358.
- [ 28 ] 任庆福, 杨志勇, 李传哲, 张天雪. 变化环境下作物蒸散研究进展. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1227-1238.
- [ 29 ] 王娟, 王建林, 刘家斌, 姜雯, 赵长星. 基于Penman-Monteith模型的两个蒸散模型在夏玉米农田的参数修正及性能评价. *应用生态学报*, 2017, 28(6): 1917-1924.
- [ 30 ] Wright J L. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1982, 108(IR2): 57-74.
- [ 31 ] Rosa R D, Paredes P, Rodrigues G C, Fernando R M, Alves I, Pereira L S, Allen R G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing. *Agricultural Water Management*, 2012, 103: 62-77.
- [ 32 ] Paredes P, Pereira L S, Rodrigues G C, Botelho N, Torres M O. Using the FAO dual crop coefficient approach to model water use and productivity of processing pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by irrigation strategies. *Agricultural Water Management*, 2017, 189: 5-18.
- [ 33 ] 彭世彰, 索丽生. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系数试验研究. *水利学报*, 2004, 35(1): 17-21.
- [ 34 ] 张强, 王文玉, 阳伏林, 王小平, 张良. 典型半干旱区干旱胁迫作用对春小麦蒸散及其作物系数的影响特征. *科学通报*, 2015, 60(15): 1384-1394.
- [ 35 ] 李谦, 景元书, 马美娟, 王晗, 李根. 低丘红壤区稻田实际蒸散特征及其气象影响因素. *生态学杂志*, 2018, 37(1): 219-226.
- [ 36 ] 冯禹, 崔宁博, 龚道枝, 王罕博, 郝卫平, 梅旭荣. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 90-98.
- [ 37 ] Anda A, da Silva J A T, Soos G. Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary. *Aquatic Botany*, 2014, 116: 53-59.
- [ 38 ] 王昊, 许士国, 孙砾石. 扎龙湿地芦苇沼泽蒸散耗水预测. *生态学报*, 2006, 26(5): 1352-1358.
- [ 39 ] 贾志军, 姬兴杰. 三江平原稻田蒸散量模拟研究. *中国农业气象*, 2014, 35(4): 380-388.
- [ 40 ] Borin M, Milani M, Salvato M, Toscano A. Evaluation of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. evapotranspiration in Northern and Southern Italy. *Ecological Engineering*, 2011, 37(5): 721-728.
- [ 41 ] Tuttolomondo T, Leto C, La Bella S, Leone R, Virga G, Licata M. Water balance and pollutant removal efficiency when considering evapotranspiration in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland in Western Sicily (Italy). *Ecological Engineering*, 2016, 87: 295-304.
- [ 42 ] Queluz J G T, Pereira F F S, Sánchez-Román R M. Evapotranspiration and crop coefficient for *Typha latifolia* in constructed wetlands. *Water Quality Research Journal of Canada*, 2018, 53(2): 53-60.
- [ 43 ] 邓雯, 陈刚, 王肖鹏, 顾世祥. 滇池外海环湖湿地生态需水研究. *灌溉排水学报*, 2016, 35(1): 99-104.
- [ 44 ] 李志威, 孙萌, 游宇驰, 余国安. 若尔盖高原实际蒸散量变化规律研究. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1317-1324.