

## 东北春玉米不同生育阶段日蒸散发模型的适用性研究

吴东<sup>1</sup> 何奇瑾<sup>1\*</sup> 潘志华<sup>1</sup> 周广胜<sup>2,3</sup> 董智强<sup>1</sup> 韩国琳<sup>1</sup> 张婧婷<sup>1</sup> 赵慧<sup>1</sup>  
黄蕾<sup>1</sup> 潘宇鹰<sup>1</sup> 王佳琳<sup>1</sup> 樊栋樑<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国气象科学研究院, 北京 100081;

3. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**摘要** 为准确估算东北地区春玉米不同生育阶段内的蒸散发量, 本研究基于锦州农田生态系统野外观测站 2007—2008 年涡度相关系统的春玉米蒸散发数据, 利用相关系数、平均偏差和均方根误差等量化指标, 结合线性加权法和法, 综合评价了 6 种日尺度蒸散发模型 (组合法: FAO 56-Penman-Monteith; 温度法: Hargreaves-Samani、Blaney-Cridde; 辐射法: Makkink、Jensen-Haise、Priestley-Taylor) 在春玉米不同生育阶段的适用性。结果表明: 1) 春玉米不同生育阶段内蒸散发平均日动态均呈单峰型曲线变化, 生长季内日蒸散发量峰值出现在花粒期初; 2) 春玉米不同生育阶段反映了其稀疏程度导致的覆盖度差异对蒸散发的影响。综合评价结果表明, 除 Priestley-Taylor 模型外, 基于辐射法模型的模拟效果整体优于组合法和温度法模型; 3) 苗期的修正 Blaney-Cridele 模型、花粒期的修正 Makkink 模型以及穗期的原始 Jensen-Haise 模型具有较高的模拟精度, 为东北春玉米不同生育阶段日蒸散发量的准确估算提供参考。

**关键词** 春玉米; 蒸散发; 模型模拟; 生育阶段; 适用性

中图分类号 S161

文章编号 1007-4333(2017)08-0018-12

文献标志码 A

## Applicability of daily evapotranspiration models at different growth stages of spring maize in Northeast China

WU Dong<sup>1</sup>, HE Qijin<sup>1\*</sup>, PAN Zhihua<sup>1</sup>, ZHOU Guangsheng<sup>2,3</sup>, DONG Zhiqiang<sup>1</sup>, HAN Guolin<sup>1</sup>, ZHANG Jingting<sup>1</sup>, ZHAO Hui<sup>1</sup>, HUANG Lei<sup>1</sup>, PAN Yuying<sup>1</sup>, WANG Jialin<sup>1</sup>, FAN Dongliang<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

3. Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** In order to accurately estimate the evapotranspiration of spring maize at different growth stages, the applicability of six daily evapotranspiration models (Combined method, FAO 56-Penman-Monteith; Temperature-based methods, Hargreaves-Samani and Blaney-Cridde; Radiation-based methods, Makkink, Jensen-Haise and Priestley-Taylor) were evaluated in spring maize farmland ecosystem. This study was conducted based on latent flux data from eddy covariance during 2007—2008 at Jinzhou Agricultural Ecosystem Research Station and by using the linear weighted sum method and three statistical indicators: correlation coefficient, mean bias error and root mean square error. The results showed that: 1) The average daily variation of evapotranspiration at different growth stages was expressed as a single peak curve and the maximum of daily evapotranspiration appeared at initial stage of flowering; 2)

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506016); 国家自然科学基金项目(41501047, 41330531, 41371232); 国家科技支撑计划(2012BAD09B02)

第一作者: 吴东, 硕士研究生, E-mail: dongw@cau.edu.cn

通讯作者: 何奇瑾, 讲师, 主要从事作物对气候变化响应与适应方面研究, E-mail: heqijin@cau.edu.cn

Different canopy density differences of spring maize at different growth stages displayed effect on evapotranspiration. The general evaluation results indicated that the radiation-based models performed better than combined and temperature-based methods excluding Priestley-Taylor model; 3) The calibrated Blaney-Criddle model in seedling stage, the original Jensen-Haise model in heading stage and the calibrated Makkink model in flowering stage accurately evaluated the evapotranspiration of spring maize. In conclusion, the results provide references for estimating daily spring maize evapotranspiration at different growth stages in Northeast, China.

**Keywords** spring maize; evapotranspiration; models simulation; growth stage; applicability

春玉米是中国东北地区的第一大粮食作物, 对全国粮食总产量的贡献已超过 1/3, 在保障粮食安全方面的作用举足轻重<sup>[1-2]</sup>。然而, 相关研究表明近几十年来中国东北地区年均温在波动中上升, 5—9 月降水量呈线性递减趋势, 与此同时, 春玉米生育期内的干旱日趋严重, 干旱面积不断扩大<sup>[3-5]</sup>, 从而使得雨养春玉米生产的不稳定性增加。蒸散发是生态系统水分的主要输出项, 也关系到地表能量的分配。因此, 弄清春玉米蒸散发的动态变化对于准确估算春玉米的耗水量并采取科学的农田水分管理措施具有重要的现实意义<sup>[6-7]</sup>。

农田蒸散发量指作物蒸腾量与土壤表面蒸发量之和。作物蒸腾主要取决于植物种类、发育阶段和种植密度等, 土壤蒸发主要取决于土壤含水量和气象要素, 如太阳辐射、温度、湿度和风速等<sup>[8]</sup>。获得农田蒸散发量的方法可分为实测法和估算法<sup>[9]</sup>。实测法包括蒸渗仪、闪烁仪和涡度相关系统等。蒸渗仪较微气象学法对风浪区的要求低, 能够实现全自动化且检修方便, 但它难以重构或维持原始土壤剖面特性, 且仅代表大区域内的小样地, 一旦作物或水分管理不一致, 就会影响测量精度<sup>[10]</sup>; 闪烁仪适合大区域内湍流通量的观测研究, 在有平流或非均匀下垫面情况下的观测值也较为准确, 但受空气污染程度影响严重<sup>[11]</sup>; 涡度相关技术是各种实测方法中最为精密和可靠的方法, 常作为对其他方法进行校正的标准, 现已广泛应用于农田生态系统、森林生态系统和湿地生态系统的相关研究<sup>[12-14]</sup>。仪器实测蒸散发能实现时间上的连续、长期观测, 但存在一些局限性, 一方面仪器测量精度易受下垫面、植被类型和作物面积大小的影响; 另一方面部分仪器昂贵, 操作复杂, 在布设、保养和维修上需要花费较多的人力和物力<sup>[15-16]</sup>。估算法主要包括遥感技术方法和作物系数法<sup>[9, 17-18]</sup>。遥感反演蒸散发具有时空连续性和大跨度的特点, 但受卫星影像监测范围和时间的局限, 反演精度不够高<sup>[19]</sup>; 作物系数法估算实际蒸散发量是在求得参考蒸散发量的基础上, 利用地表植被信

息以及地表实际状况对土壤水分供给的胁迫逐步修正而来, 该法能简单有效地估算实际蒸散发量, 并已在草地和农田水管理中得到普遍应用<sup>[9, 20]</sup>。

当前, 基于作物系数法估算实际蒸散发量的 ET<sub>0</sub>(参考蒸散发) 模型众多<sup>[21]</sup>, 但不同的模型是根据一定的对象和条件发展起来的, 对同一生态系统蒸散发的模拟能力差异明显。甚至作为世界粮农组织(FAO)推荐的适用于干旱和湿润气候条件下的 Penman-Monteith 模型在某些区域的适用性也不高<sup>[22-26]</sup>。且以往研究中以涡度相关系统的实际观测为标准, 采用作物系数法综合开展针对具体作物不同生育阶段的多种蒸散发模型的适用性研究仍不多见。为此, 本研究选取常用的参考蒸散发模型, 包括 FAO 56-Penman-Monteith 模型(又称组合法, 考虑了多个气象因子的综合影响), Hargreaves-Samani 模型和 Blaney-Criddle 模型(又称温度法, 主要考虑温度的影响), Makkink 模型、Jensen-Haise 模型和 Priestley-Taylor 模型(又称辐射法, 主要考虑辐射的影响)<sup>[27-29]</sup>, 结合作物系数、水分胁迫系数估算辽宁省锦州地区春玉米生育期内的实际蒸散发, 并以当前地气交换研究中首选的通量观测仪器-涡度相关系统实测数据为标准<sup>[30]</sup>, 评价各类蒸散发模型在春玉米不同生育阶段的适用性, 旨在为其他地区的春玉米蒸散发研究提供借鉴。

## 1 数据与方法

### 1.1 区域概况

研究区域位于锦州农田生态系统野外观测站(41°8′53″N, 121°12′6″E, 海拔 23 m)。该地属于温带季风性气候, 四季分明, 常年温差较大, 年平均气温 8~9 °C, 年降水量 540~640 mm, 6—8 月降水量占全年的 70%, 无霜期为 180 d<sup>[31-32]</sup>。供试玉米品种为“华丹 4 号”杂交种, 农田占地 43 hm<sup>2</sup>, 播种前实行条翻, 并按 300 kg/hm<sup>2</sup> 的量一次性施入氮肥(碳酸氢铵), 以保证作物的养分供应, 春玉米生育期内无灌溉。

## 1.2 数据观测与处理

研究时段为2007年(5月10日—9月24日)和2008年(5月13日—9月25日)春玉米生育期。观测数据主要分为两类,一类是基于小气候观测系统的气象数据,包括日最高气温( $T_{\max}$ )、日最低气温( $T_{\min}$ )、日平均风速( $U_{2.5}$ )、地表净辐射( $R_n$ )和太阳短波辐射( $R_s$ )等。此外,系统还配备52203雨量筒、土壤热通量板和EasyAG土壤水分传感器用于测量降水量、土壤热通量( $G$ )和土壤体积含水量( $\theta$ )。系统每30 min输出一组平均值,并相应输出各观测变量的日均值,运用SPSS软件对缺失的气象数据采用线性插值法进行插值,计算过程由Excel实现。另一类数据来自涡度相关系统观测,涡度相关仪安装在面积为25 m×25 m的玉米农田观测场内,架设高度为3.5 m,样地周围(1 km内)地势平坦开阔,无任何高大建筑物遮蔽,从而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。系统由测量三维风速和超声虚温的超声风速仪CAST3(Campbell Scientific, Inc.)以及测量H<sub>2</sub>O绝对密度的Li7500型(Li-COR, Inc.)红外气体分析仪等构成。仪器采样频率为10 Hz,工作时由涡度相关原理计算在线通量,并存储为30 min的潜热通量数据。系统同时对在线通量进行坐标旋转和密度变化(WPL)订正,然后对30 min潜热通量数据进行质量控制(阈值剔除、夜间摩擦风速<0.15 m/s时的数据剔除),并采用查表法(建立潜热通量数据与环境因子之间的关系)对经过剔除的数据进行插补。由于降水将导致超声探头无法正常工作,为保证结果的合理性,在数据分析过程中,剔除了降水日的潜热通量数据。然后将得到的30 min潜热通量数据,计算转化为日尺度数据。玉米农田涡度相关系统的通量观测呈现能量不闭合现象,约有15.5%的能量损失<sup>[33]</sup>。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 春玉米实际蒸散发量的计算

根据FAO的建议,在供水不充分条件下,作物实际蒸散发量可表示为<sup>[34]</sup>:

$$ET = K_s K_c ET_0 \quad (1)$$

式中:ET为实际蒸散发量,mm/d;ET<sub>0</sub>为参考蒸散发量,mm/d;K<sub>s</sub>为土壤水分胁迫系数;K<sub>c</sub>为作物系数。

春玉米逐日作物系数由张淑杰等<sup>[35]</sup>建立的模型计算,土壤水分胁迫系数K<sub>s</sub>的大小取决于土壤

体积含水量( $\theta$ , m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)和介于实测的田间持水量( $\theta_c$ , kg/kg)与凋萎含水量( $\theta_w$ , kg/kg)之间的临界含水量( $\theta_j$ , m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)(涉及土壤含水率的参数在计算过程中都转化为体积含水量),临界含水量 $\theta_j$ 可表示为<sup>[36]</sup>:

$$\theta_j = \theta_c - (\theta_c - \theta_w)[b + 0.04(5 - ET_c)] \quad (2)$$

式中:ET<sub>c</sub>,mm/d,为大田玉米在无病虫害、水肥供应充足且农艺措施良好条件下的蒸散发量,它是K<sub>c</sub>与ET<sub>0</sub>的乘积;b取决于作物种类,对于玉米,b为0.55<sup>[34]</sup>。根据土壤体积含水量 $\theta$ 与土壤临界含水量 $\theta_j$ 之间的大小关系,土壤水分胁迫系数K<sub>s</sub>可表示为<sup>[36]</sup>:

$$K_s = \begin{cases} 0 & , \theta \leq \theta_w \\ \frac{1}{0.8 - b + 0.04ET_c} \frac{\theta - \theta_w}{\theta_c - \theta_w} & , \theta_w < \theta < \theta_j \\ 1 & , \theta \geq \theta_j \end{cases} \quad (3)$$

本研究选用当前广泛应用的6种日尺度参考蒸散发模型估算ET<sub>0</sub>。

### 1.3.1.1 组合法

组合法主要采用FAO 56-Penman-Monteith(P-M)模型。1998年FAO推荐P-M模型作为ET<sub>0</sub>的标准计算方法,其假设参考作物为高度12 cm,固定表面阻力为70 s/m,反射率为0.23,表面开阔、高度一致、生长旺盛、完全遮盖地面而不缺水的绿色草地的蒸散发量,具体公式为<sup>[34]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_2 + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中:R<sub>n</sub>为地表净辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d);G为土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d);T<sub>2</sub>为2 m高处日平均气温,℃;U<sub>2</sub>为2 m高处风速,m/s;e<sub>s</sub>为饱和水汽压,kPa;e<sub>a</sub>为实际水汽压,kPa;Δ为饱和水汽压曲线斜率,kPa/℃;γ为干湿表常数,kPa/℃。

### 1.3.1.2 温度法

研究选用2种温度蒸散发模型,分别为Hargreaves-Samani(H-S)模型和Blaney-Criddle(B-C)模型。其中H-S模型最初是在美国西北部较干旱的气候条件下估算草地蒸散发时建立的。由于太阳辐射资料经常无法获得,Hargreaves等<sup>[37]</sup>于1985年提出用地球外辐射R<sub>a</sub>替代太阳短波辐射R<sub>s</sub>,从而计算参考蒸散发,具体公式为:

$$ET_0 = 0.0023(T_2 + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \frac{R_a}{\lambda} \quad (5)$$

式中： $T_{max}$  为日最高气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $T_{min}$  为日最低气温， $^{\circ}\text{C}$ ； $R_a$  为地球外辐射， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； $\lambda$  为蒸发潜热， $\lambda = 2.45 \text{ MJ}/\text{kg}$ ，其余各项物理意义及单位同式(4)。

B-C 模型是 1950 年 Blaney 和 Criddle 在估算美国西部地区作物需水的过程中提出的，其在美国西部得到广泛应用，其常见公式为<sup>[38]</sup>：

$$ET_0 = kp(0.46T_2 + 8.13) \quad (6)$$

式中， $k$  为月尺度消耗使用系数，依赖于植被类型、地理位置和季节，常取值 0.85； $p$  为日昼长(可照时数)占全年白昼时间( $365 \times 12$ )的百分数，其余各项物理意义及单位同式(4)。

### 1.3.1.3 辐射法

研究采用的辐射蒸散发模型包括 3 种，分别为 Makkink (Mak) 模型、Jensen-Haise (J-H) 模型和 Priestley-Taylor (P-T) 模型。

Mak 模型是 1957 年 Makkink 估算荷兰冷凉天气条件下草地的蒸散发时，对 Penman 公式进行验证的过程中提出的。它忽略了空气动力学项，用入射短波辐射  $R_s$  替代净辐射平衡。不同研究学者根据研究区域的不同，主要针对系数作不同程度的改进，在此采用 Alexandris<sup>[39]</sup> 提出的表达式：

$$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (7)$$

式中： $R_s$  为太阳短波辐射， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ，其余各项物理意义及单位同(4)和(5)式。

1963 年，Jensen 和 Haise 通过土壤采样，在评估大量蒸散发的观测值之后提出了 J-H 模型<sup>[40]</sup>。在此选取应用较广泛的一种公式，具体表达式为<sup>[41]</sup>：

$$ET_0 = 0.02175(T_2 - 3) \frac{R_s}{\lambda} \quad (8)$$

式中：各项物理意义及单位同式(4)、(5)和(7)。

1972 年，Priestley 和 Taylor 基于大量海面 and 湿润陆面的资料，以平衡蒸散为基础对 Penman 公式进行修正，得到无平流条件下的蒸散发模型，具体公式为<sup>[42]</sup>：

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (9)$$

式中： $\alpha$  为经验系数，一般取值 1.26，其余各项物理

意义及单位同式(4)和(5)。

### 1.3.2 模型评价方法

研究主要选用相关系数(Correlation Coefficient,  $R$ )、平均偏差(Mean Bias Error, MBE)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)3 项统计指标对模型模拟春玉米蒸散发量的准确性进行多角度评价，计算公式如下：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (10)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (12)$$

式中： $x_i$  为模型模拟值； $y_i$  为涡度相关系统实测值； $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别为研究时段内模拟值与实测值的平均； $n$  为样本数。 $R$  越接近 1，表示模拟值与实测值正向一致性越高，二者之间有相似的变化规律；MBE 表示模拟值对实测值的日平均偏差的大小，正负表示结果的倾向性；RMSE 用于判断模型的精确性，其值越接近 0，模型的精确度越高。

采用线性加权和法对 6 种模型在春玉米不同生育阶段的综合模拟能力进行全面评价，其所得综合评价值的大小反映了各模型模拟能力的高低，数值越大，模型的适用性越高。具体指：在春玉米全生育期及不同的生育阶段，由 6 种模型的 3 项统计指标 ( $R$ 、MBE 和 RMSE) 构造原始数据矩阵  $\mathbf{A}_{6 \times 3}$ ，其中  $a_{ij}$  ( $1 \leq i \leq 6, 1 \leq j \leq 3$ ) 为第  $i$  个模型的第  $j$  个统计指标值；将逆向指标 ( $|MBE|$  和 RMSE) 取倒数转换为正向指标后得到矩阵  $\mathbf{B}_{6 \times 3}$ ，其中  $b_{ij} = 1/|a_{ij}|$  ( $1 \leq i \leq 6, 2 \leq j \leq 3$ )，并对矩阵  $\mathbf{B}_{6 \times 3}$  做标准化处理得到矩阵  $\mathbf{C}_{6 \times 3}$ ，以此消除指标量纲不同可能带来的影响；对全生育期内处理得到的矩阵  $\mathbf{C}_{6 \times 3}$ ，通过主成份分析法得到各主成份的特征值  $\beta_m$  ( $\beta_1 \geq \beta_2 \geq \beta_3 \geq 0$ ) 及相应的特征向量  $\mathbf{V}_m = (v_{m1}, v_{m2}, v_{m3})^T$  ( $1 \leq m \leq 3$ )。以方差累计贡献率  $\geq 80\%$  为标准确定主成份个数为  $q$  ( $1 \leq q \leq 3$ )，则各指标权重  $W_j$  等于以主成份特征值占比为权重，对该指标在各主成份线性组合中系数的加权平均的归一化，表达式为：

$$W_j = \frac{\sum_{f=1}^q \frac{v_{fj}\beta_f}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_q}}{\sum_{j=1}^3 \sum_{f=1}^q \frac{v_{fj}\beta_f}{\beta_1 + \beta_2 + \dots + \beta_q}} \quad (13)$$

式中： $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_f$  和  $\beta_q$  为各主成份所对应的特征值； $v_{fj}$  为第  $f$  个主成份的线性组合中第  $j$  个指标对应的系数。则春玉米不同生育阶段各模型的综合评价价值  $F_i$  的表达式为：

$$F_i = \sum_{j=1}^3 W_j c_{ij} \quad (14)$$

式中： $c_{ij}$  为矩阵  $C_{6 \times 3}$  中第  $i$  个模型经过标准化处理的第  $j$  个统计指标值。

## 2 结果分析

### 2.1 春玉米蒸散发动态

按照玉米生育期的形态特征、生长性质和栽培管理,可将其划分为3个不同的生育阶段:苗期阶段(出苗至拔节)、穗期阶段(拔节至抽雄)和花粒期阶段(抽雄至成熟)。基于涡度相关系统实测的春玉米生育期内的蒸散发数据,分析2007—2008年不同生育阶段蒸散发的平均日动态变化特征(图1)。春玉米蒸散发的日变化在苗期、穗期和花粒期均呈先缓慢增加、再快速增加至最大值,而后由最大值快速下降、再缓慢下降至最小值的分布趋势。7:00—19:00穗期的蒸散发量大于苗期和花粒期的蒸散发量。苗期,穗期和花粒期阶段的日内最大蒸散发量分别为0.16、0.32和0.31 mm/h,峰值对应的时刻分别是

12:00、14:00和13:00。在夜间,3个生育阶段的蒸散发量大致相等且普遍接近0。

2007和2008年春玉米生育期内日蒸散发量季节动态表现为单峰型,最大值出现在花粒期初,各模型模拟值与实测值的大小存在差异,但变化趋势基本一致(图2(a)和图2(b))。春玉米全生育期内,随着种子出苗,地上部分茎、叶量增加,日蒸散发量逐渐增加,至花粒期初,日蒸散发量达到峰值,之后,气温降低,叶片衰老变黄,蒸散作用逐渐减弱。

### 2.2 模型的适用性分析

#### 2.2.1 相关分析

春玉米苗期阶段,Mak模型与J-H模型模拟值与实测值的相关性较强,而其他模型对苗期阶段蒸散发的动态模拟较差,其中,P-T模型模拟值与实测值的相关性最弱且不显著(表1);穗期阶段,除B-C模型模拟值与实测值的相关性减弱且不显著外,各模型对穗期阶段蒸散发的模拟能力均有所提升。与实测值相关性最强的为J-H模型和Mak模型,相关系数分别为0.615和0.627;花粒期阶段,各模型模拟值与实测值都表现为极显著的相关关系,但基于温度法的2种模型与实测值的相关性较弱,其中,B-C模型的相关系数仅为0.380。

6种模型在模拟春玉米不同生育阶段的蒸散发过程中,P-M模型与P-T模型对蒸散发的模拟能力随着生育期的推进而增强,H-S模型、Mak模型和J-H模型的模拟能力在穗期表现最为突出,R达到

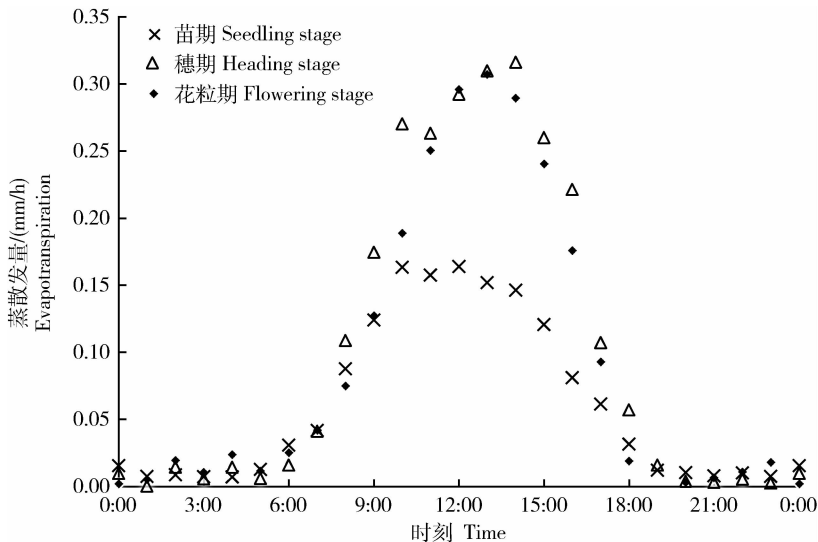
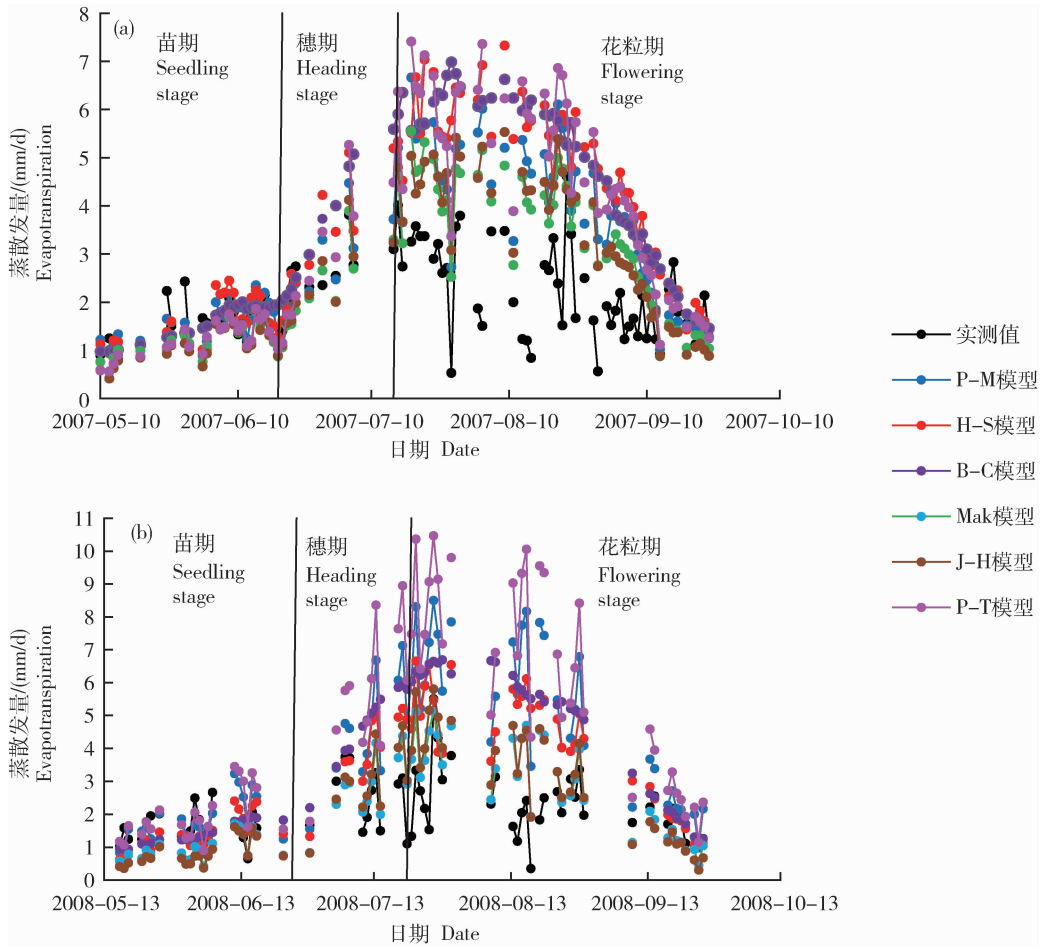


图1 春玉米不同生育阶段蒸散发的平均日动态



实测值, Measured values; P-M 模型, P-M model; P-T 模型, P-T model; J-H 模型, J-H model; H-S 模型, H-S model; B-C 模型, B-C model; Mak 模型, Mak model.

图 2 2007 年 (a) 和 2008 年 (b) 春玉米蒸散发季节变化及各模型模拟值的大小

Fig. 2 Seasonal variation of spring maize evapotranspiration and the amount of simulated values in 2007(a) and 2008(b)

表 1 模型模拟值与实测值的相关系数

Table 1 Correlation coefficient of simulated and observed evapotranspiration

生育期 Growth stage	$R_{P-M}$	$R_{H-S}$	$R_{B-C}$	$R_{Mak}$	$R_{J-H}$	$R_{P-T}$
苗期 Seedling stage	0.457**	0.497**	0.442**	0.557**	0.600**	0.310#
穗期 Heading stage	0.511*	0.559*	0.415#	0.627**	0.615*	0.504*
花粒期 Flowering stage	0.531**	0.380**	0.465**	0.546**	0.564**	0.529**
全生育期 Whole growth stage	0.562**	0.472**	0.519**	0.587**	0.604**	0.556**

注: \*\* 表示通过了 99% 的信度检验, \* 表示通过了 95% 的信度检验, # 表示未通过 95% 的信度检验。

Note: \*\* represents that the confidence level is 99%, \* represents that the confidence level is 95%, # represents that the confidence level is less than 95%.

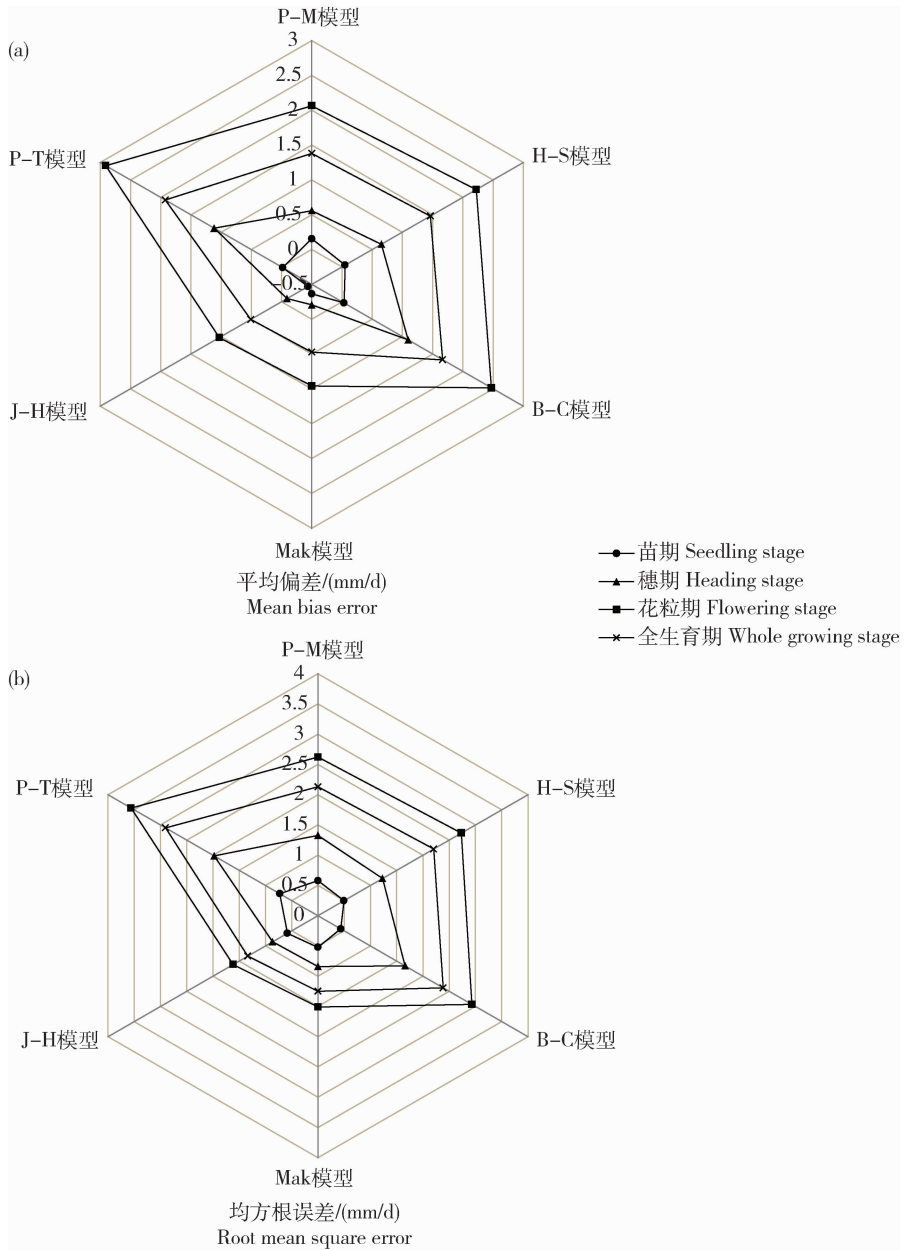
最大值, 而 B-C 模型在花粒期对蒸散发的模拟效果最优。根据相关性的比较, 就全生育期而言, J-H 模

型与 Mak 模型对春玉米蒸散发的模拟效果整体优于其他 4 种蒸散发模型。

### 2.2.2 平均偏差

在春玉米的不同生育阶段,组合法和温度法模型的模拟值都高估了蒸散发量,但对辐射法模型而言,其模拟值高估和低估现象并存(图 3(a))。春玉米苗期阶段,6 种模型模拟值的|MBE|整体较小,尤其是 H-S 模型、B-C 模型和 P-T 模型模拟值的 MBE 几乎为 0,其中,P-T 模型对蒸散发的低估量

仅为 0.019 mm/d;穗期阶段与其他模型相比,Mak 模型与 J-H 模型低估了蒸散发量,但二者的|MBE|最小,分别为 0.206 和 0.091 mm/d; J-H 模型与 Mak 模型在花期阶段模拟值的 MBE 仍最小,而其他模型模拟值的 MBE 显著增大,特别是 P-T 模型模拟值的偏差最大,达到 2.909 mm/d。



P-M 模型, P-M model; P-T 模型, P-T model; J-H 模型, J-H model; H-S 模型, H-S model; B-C 模型, B-C model; Mak 模型, Mak model.  
**图 3 不同生育阶段模型模拟值的平均偏差(a)和均方根误差(b)**

Fig. 3 Mean bias error(a) and root mean square error(b) between simulated and observed evapotranspiration at different growth stages

随着春玉米生长发育的进行,组合法模型、温度法模型和基于辐射法的 P-T 模型模拟值的 |MBE| 逐渐增大,尤以 P-T 模型和 B-C 模型的增加最显著,而相较于苗期和花粒期,Mak 模型与 J-H 模型在穗期模拟值的 |MBE| 最小。从春玉米全生育期各模型模拟值的 MBE 来看,J-H 模型与 Mak 模型模拟值的 MBE 均低于其他 4 种蒸散发模型,MBE 值分别为 0.472 和 0.509 mm/d。

2.2.3 均方根误差

春玉米苗期阶段,各模型模拟值的 RMSE 整体较小且相差不大,其中,基于温度法的 H-S 模型与 B-C 模型模拟值的 RMSE 最小,分别为 0.495 和 0.436 mm/d(图 3(b));基于辐射法的 Mak 模型与 J-H 模型在穗期和花粒期阶段对蒸散发模拟的精确性最高,二者模拟值的 RMSE 与其他 4 种模型相比都最小。而同是基于辐射法的 P-T 模型在 3 个生育阶段的 RMSE 值均最大,表明在均方根误差方

面,P-T 模型对蒸散发的模拟精度不高。6 种模型随着生长发育的进行,其模拟值的 RMSE 均逐渐增大。但值得注意的是,在全生育期内,P-M 模型对蒸散发模拟值的 RMSE 最小,为 1.131 mm/d,其次是 Mak 模型与 J-H 模型,表明就全生育期而言,组合法模型对蒸散发的模拟精度最高,其估算结果更为可靠。

2.2.4 模型综合评价

在利用多种统计指标从不同角度表征模型模拟能力的过程中,可以采用线性加权和法评价各模型的综合模拟能力。运用主成份分析法,根据式(13)对 R、MBE 和 RMSE 3 项统计指标分配权重,结果分别为 0.301、0.353 和 0.346。再由式(14)计算得到 6 种模型在各生育阶段的综合评价价值,并对模型的适用性排名(表 2)。综合评价价值越大,模型的排名序号越小,适用性越高;反之,模型的排名序号越大,适用性越差。

表 2 6 种模型综合评价  
Table 2 Overall rank of six models

模型 Model	苗期 Seedling stage		穗期 Heading stage		花粒期 Flowering stage	
	综合评价价值 Overall value	排名 Rank	综合评价价值 Overall value	排名 Rank	综合评价价值 Overall value	排名 Rank
	P-M	-0.419	6	-0.359	4	-0.157
H-S	0.251	2	-0.128	3	-0.893	6
B-C	0.594	1	-0.987	6	-0.628	5
Mak	0.068	3	0.892	2	1.163	1
J-H	-0.089	4	1.350	1	1.063	2
P-T	-0.405	5	-0.768	5	-0.548	4

春玉米苗期阶段,温度法模型的模拟效果优于组合法和辐射法模型,B-C 模型对蒸散发的模拟最优。穗期和花粒期阶段,除 P-T 模型外,辐射法模型的综合模拟能力均较强,相应的最优模型分别为 J-H 模型和 Mak 模型。其中,J-H 模型在穗期既能精确估算春玉米蒸散发量,也能模拟春玉米蒸散发动态,且此阶段是春玉米营养生长和生殖生长并进阶段,也是春玉米的水分临界期,水分亏缺会极大地影响作物产量。准确地估算蒸散发量对提高水分利用率具有重要意义。

性逐渐增强,温度法模型的适用性逐渐减弱,而辐射法模型中,除 P-T 模型的模拟能力相对较差外,Mak 模型与 J-H 模型对蒸散发的模拟能力均较强。

2.2.5 适于东北春玉米日蒸散发模型的建立

综上所述,尽管 B-C 模型、J-H 模型和 Mak 模型在 6 种模型中能相对精确地模拟春玉米不同生育阶段的蒸散量,但模拟结果仍存在一定误差。因此有必要基于观测的蒸散发数据分别对苗期、穗期和花粒期阶段内模拟效果最优的模型(B-C 模型、J-H 模型和 Mak 模型)进行校正并验证。首先根据 2007 年实测蒸散发数据构建不同生育阶段实测值

随着春玉米生育期的推进,组合法模型的适用



与相应模型模拟值的回归方程(回归直线强制过原点);然后依据回归直线的斜率对相应模型的原始参

数进行修正;再利用2008年实测蒸散发数据对比分析校正前后模型的模拟能力(表3)。

表3 不同生育阶段模型校正前后误差分析

Table 3 Error analysis before and after correction for models at different growth stages

生育期 Growth stage	模型 Model	模型形式 Model form	回归方程 Regression equation	校正前 Before correction			校正后 After correction		
				参数 Parameter	MBE/ (mm/d)	RMSE/ (mm/d)	参数 Parameter	MBE/ (mm/d)	RMSE/ (mm/d)
苗期 Seedling stage	B-C	$ET_0 = k p(0.46T_2 + 8.13)$	$Y=0.982 2X$	$k=0.85$	0.121	0.494	$k=0.835$	0.093	0.484
穗期 Heading stage	J-H	$ET_0 = \mu(T_2 - 3) \frac{R_s}{\lambda}$	$Y=0.979 2X$	$\mu=0.021 75$	-0.023	1.319	$\mu=0.021 30$	0.078	1.307
花粒期 Flowering stage	Mak	$ET_0 = \sigma \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} + \omega$	$Y=0.612 4X$	$\sigma=0.61;$ $\omega=-0.12$	0.605	1.264	$\sigma=0.37;$ $\omega=-0.07$	-0.522	0.991

经过参数修正,苗期阶段的B-C模型模拟值的MBE和RMSE均减小;花粒期阶段的Mak模型模拟值的MBE由校正前的正偏差转变为校正后的负偏差,且偏差量减小,模型的模拟精度提升;而穗期的J-H模型在校正前其模拟值的|MBE|几乎为0,而校正后的模拟能力提升不明显,模型模拟值的|MBE|反而增大。综上,认为校正后的B-C模型和Mak模型以及原始J-H模型能准确地模拟春玉米苗期、花粒期和穗期阶段的日蒸散发量。

### 3 结论与讨论

基于2007和2008年锦州农田生态系统野外观测站涡度相关系统观测的春玉米潜热通量数据和小气候观测系统实测的气象数据及土壤水分数据等,分析了春玉米在苗期、穗期和花粒期阶段蒸散发的日动态;采用相关分析法分别对比了6种蒸散发模型(P-M模型、H-S模型、B-C模型、Mak模型、J-H模型和P-T模型)在苗期、穗期和花粒期阶段对春玉米蒸散发的模拟能力;同时运用MBE和RMSE比较了各模型估算实际蒸散发量误差的大小。利用线性加权和法得到各模型的综合评价值,综合评估各模型的适用性,认为B-C模型、J-H模型和Mak模型能够更加精确地估算春玉米相应生育阶段内的

蒸散发量,进而构建了适于东北春玉米不同生育阶段日蒸散发估算模型。具体结论如下:

1)春玉米在不同生育阶段内蒸散发的平均日动态均表现为单峰型,全生育期内日蒸散发量峰值出现在花粒期初。苗期、穗期和花粒期日内最大蒸散发量分别为0.16、0.32和0.31 mm/h,峰值对应的时刻分别是12:00、14:00和13:00。

2)线性加权和法的初步评估结果表明,在东北地区采用作物系数法估算春玉米苗期、穗期和花粒期阶段日蒸散发量的相对最优模型分别为B-C模型、J-H模型和Mak模型。整体而言,除P-T模型外,辐射法模型的模拟效果整体优于组合法和温度法模型。

3)基于线性加权和法的评估结果,通过调整模型参数,构建了东北地区春玉米不同生育阶段的日蒸散发模型。校正后苗期的B-C模型和花粒期的Mak模型以及穗期的原始J-H模型具有较高的模拟精度,从而为准确估算春玉米生育期内的日蒸散发量提供了依据。

值得注意的是,影响蒸散发的因素众多,地域差异较大,选用的方法不同,研究结果也不尽相同<sup>[43]</sup>。本研究中,在春玉米部分生育阶段,多数模型模拟值存在高估现象,一方面可能是由于涡度相关系统仪

器自身原因,对通量存在低估现象<sup>[44-45]</sup>;另一方面可能是因为作物系数模型的模拟效果问题,作物系数受气候、作物生长状况、土壤和管理方式等多方面的影响,而研究所用作物系数模型只考虑了气象要素。研究区属于半湿润地区,2007和2008年降水主要集中在春玉米穗期和花粒期,降水日数接近两阶段总日数的1/2。在苗期阶段,降水日数少且多为小雨,气温在春玉米蒸散发过程中起主导作用,温度法模型能够准确地模拟蒸散发,而随着生育期的推进,阴雨天增加,空气相对湿度高,风速和辐射等气象要素也发生复杂的变化,仅仅考虑气温已无法有效地模拟春玉米蒸散发量。从评价结果看,基于辐射法的P-T模型的模拟效果不及Mak模型和J-H模型。这可能与模型的适宜气候区有关,有研究表明Mak模型在半湿润区模拟蒸散发的误差最小<sup>[46]</sup>,而Xu等<sup>[38]</sup>和Trajkovic等<sup>[41]</sup>已证实P-T模型在湿润区的适用性更强。也有学者指出J-H模型随着气候湿润度的增加,其模拟夏季蒸散发的误差增大,这与该模型源于美国西部干旱半干旱区有关,但与本研究结果存在差异,植被类型的不同可能是其原因<sup>[47]</sup>;此外,P-M模型可能由于自身区域性较强,进而导致其在该地区的模拟能力并不十分突出<sup>[26,48]</sup>。

总之,准确地估算春玉米生育期内不同生育阶段的日蒸散发量,有助于了解玉米农田生态系统中土壤、植物和大气之间的水汽交换和提高水分利用效率,可为其他地区春玉米蒸散发的研究提供借鉴和参考。

## 参考文献 References

- [1] 陈长青,类成霞,王春春,张卫建. 气候变暖下东北地区春玉米生产潜力变化分析[J]. 地理科学,2011,31(10):1272-1279  
Chen C Q,Lei C X,Wang C C,Zhang W J. Changes of spring maize potential productivity under the background of global warming in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011,31(10):1271-1279 (in Chinese)
- [2] 赵锦,杨晓光,刘志娟,吕硕,王静,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响 X 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(16):3143-3156  
Zhao J,Yang X G,Liu Z J,Lv S,Wang J,Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China X The possible impacts of climate change on climatic suitability of spring maize in the three provinces of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (16): 3143-3156 (in Chinese)
- [3] 张杰,钱维宏,丁婷. 东北地区5—9月降水特征和趋势分析[J]. 气象,2010,36(8):1-7  
Zhang J, Qian W H, Ding T. Characteristics and trends of rainfall events in Northeast China from May to September during 1956—2008[J]. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(8): 1-7 (in Chinese)
- [4] 贺伟,布仁仓,熊在平,胡远满. 1961—2005年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531  
He W, Bu R C, Xiong Z P, Hu Y M. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(2): 519-531 (in Chinese)
- [5] 杨帆,刘布春,刘园,杨晓娟. 气候变化对东北玉米干旱指数保险纯费率厘定的影响[J]. 中国农业气象,2015,36(3):346-355  
Yang F,Liu B C,Liu Y,Yang X J. Impact of climate change on pure premium rating of drought index insurance for maize in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015,36(3):346-355 (in Chinese)
- [6] 赵璐,梁川,崔宁博,梁焯峰. 不同ET<sub>0</sub>计算方法在川中丘陵地区的比较及改进[J]. 农业工程学报,2012,28(24):92-98  
Zhao L, Liang C, Cui N B, Liang Y F. Comparison and improvement of different calculation methods for ET<sub>0</sub> in hilly area of central Sichuan Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012,28(24):92-98 (in Chinese)
- [7] He D,Liu Y,Pan Z,An P L,Wang L W,Dong Z Q,Zhang J T, Pan X B,Zhao P Y. Climate change and its effect on reference crop evapotranspiration in central and western Inner Mongolia during 1961—2009[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2013, 7 (4):417-428
- [8] 王朝华. 农田蒸散发量变化规律分析[J]. 水文,2005,25(3):35-37,55  
Wang C H. Analysis of changing rules of cropland evapotranspiration[J]. *Hydrology*, 2005, 25(3): 35-37, 55 (in Chinese)
- [9] Yang F L, Zhou G S. Characteristics and modeling of evapotranspiration over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1): 139-147
- [10] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, Jensen M E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. *Agricultural Water Management*, 2011,98(6):899-920
- [11] 卢俐,刘绍民,孙敏章,王介民. 大孔径闪烁仪研究区域地表通量的进展[J]. 地球科学进展,2005,20(9):932-938  
Lu L,Liu S M,Sun M Z,Wang J M. Advances in the study of areal surface fluxes with large aperture scintillometer[J]. *Advances in Earth Science*, 2005,20(9):932-938 (in Chinese)
- [12] 王罕博,龚道枝,梅旭荣,郝卫平. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散发动态比较[J]. 农业工程学报,2012,28(22):88-94  
Wang H B, Gong D Z, Mei X R, Hao W P. Dynamics

- comparison of rain-fed spring maize growth and evapotranspiration in plastic mulching and un-mulching fields [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(22): 88-94 (in Chinese)
- [13] 顾雪峰, 曹明奎, 于贵瑞, 陶波, 温学发, 刘允芬, 张雷明. 典型森林生态系统碳交换的机理模拟及其与观测的比较研究[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(3): 313-321  
Gu X F, Cao M K, Yu G R, Tao B, Wen X F, Liu Y F, Zhang L M. Modeling carbon exchange in different forest ecosystem by CEVSA model comparison with eddy covariance measurements [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(3): 313-321 (in Chinese)
- [14] 于文颖, 周广胜, 迟道才, 周莉, 何奇瑾. 盘锦湿地芦苇 (*Phragmites communis*) 群落蒸发散主导影响因素[J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4594-4601  
Yu W Y, Zhou G S, Chi D C, Zhou L, He Q J. Evapotranspiration of phragmites community in Panjin wetland and its controlling factors[J]. *Acta ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4594-4601 (in Chinese)
- [15] 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 76-81  
Jiang H F. *Agronomy*[M]. Beijing: Science Press, 2008: 76-81 (in Chinese)
- [16] 宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1186-1195  
Song L L, Yin Y H, Wu S H. Advancements of the metrics of evapotranspiration[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1186-1195 (in Chinese)
- [17] 司希礼, 杨增元, 杨增丽, 时玉兰, 徐军, 范敬华, 赵文聚. 区域综合蒸散发量计算方法研究[J]. *水文*, 2003, 23(4): 17-21  
Si X L, Yang Z Y, Yang Z L, Shi Y L, Xu J, Fan J H, Zhao W J. Study on the calculation method for regional synthetic evapotranspiration[J]. *Hydrology*, 2003, 23(4): 17-21 (in Chinese)
- [18] Park J, Choi M. Estimation of evapotranspiration from ground-based meteorological data and global land data assimilation system (GLDAS) [J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2015, 29: 1963-1992
- [19] 刘钰, 彭致功. 区域蒸散发监测与估算方法研究综述[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2009, 7(2): 256-264  
Liu Y, Peng Z G. A review of monitoring and estimating methods for regional evapotranspiration[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2009, 7(2): 256-264 (in Chinese)
- [20] Zhang F, Zhou G S, Wang Y, Yang F L, Nilsson C. Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(3): 379-386
- [21] 杜加强, 舒俭民, 刘成程, 王丽雯, 郭扬, 张林波. 黄河上游参考作物蒸散量变化特征及其对气候变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(12): 92-100  
Du J Q, Shu J M, Liu C C, Wang L W, Guo Y, Zhang L B. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration and its responses to climate change in upstream areas of Yellow River basin [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(12): 92-100 (in Chinese)
- [22] Jacobs A F G, De Bruin H A R. Makkink's equation for evapotranspiration applied to unstressed maize [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(7): 1063-1066
- [23] Li Y L, Cui J Y, Zhang T H, Zhao H L. Measurement of evapotranspiration of irrigated spring wheat and maize in a semi-arid region of north China [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 61(1): 1-12
- [24] Utset A, Farre I, Martinez-Cob A, Caverro J. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 66(3): 205-219
- [25] Zhao W, Liu B, Zhang Z. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(2): 215-223
- [26] 米娜, 张玉书, 陈鹏狮, 纪瑞鹏, 蔡福, 李荣平, 王树森. 几种蒸散模型在玉米农田蒸散量计算中的应用比较[J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1599-1606  
Mi N, Zhang Y S, Chen P S, Ji R P, Cai F, Li R P, Wang S S. A comparative study on estimation models for field evapotranspiration [J]. *Resources Science*, 2009, 31(9): 1599-1606 (in Chinese)
- [27] Lu J, Sun G, McNulty S G, Amatya D M. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2005, 41(3): 621-633
- [28] Farahani H J, Howell T A, Shuttleworth W J, Bausch W C. Evapotranspiration: Progress in measurement and modeling in agriculture [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Biological Engineers*, 2007, 50(5): 1627-1638
- [29] Tabari H, Grismer M E, Trajkovic S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(2): 107-117
- [30] Massman W J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104(3): 185-198
- [31] 李荣平, 周广胜, 王宇. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应[J]. *科学通报*, 2010, 55(13): 1247-1254  
Li R P, Zhou G S, Wang Y. Responses of soil respiration in non-growing seasons to environmental factors in a maize agroecosystem, Northeast China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(13): 1247-1254 (in Chinese)
- [32] 王宇, 周广胜. 雨养玉米农田生态系统的蒸散特征及其作物系数[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 647-653  
Wang Y, Zhou G S. Evapotranspiration characteristics and coefficient of rain-fed maize agroecosystem [J]. *Chinese Journal*

- of *Applied Ecology*, 2010, 21(3): 647-653 (in Chinese)
- [33] 李伟君, 许振柱, 王云龙, 周莉, 周广胜. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(6): 1132-1144  
Li Y J, Xu Z Z, Wang Y L, Zhou L, Zhou G S. Latent and sensible heat fluxes and energy balance in a maize agroecosystem[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(6): 1132-1144 (in Chinese)
- [34] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration guidelines for computing water requirements[J]. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 1998, 56: 1-115
- [35] 张淑杰, 周广胜, 李荣平. 基于湍度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 695-704  
Zhang S J, Zhou G S, Li R P. Daily crop coefficient of spring maize using eddy covariance observation and its actual evapotranspiration simulation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(6): 695-704 (in Chinese)
- [36] 胡庆芳, 尚松浩, 田俊武, 孟宝泉. FAO 56 计算水分胁迫系数的方法在田间水量平衡分析中的应用[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 40-43  
Hu Q F, Shang S H, Tian J W, Meng B Q. Application of water stress coefficient from FAO 56 to the field water balance analysis [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 40-43 (in Chinese)
- [37] Xu C Y, Singh V P. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(2): 305-319
- [38] Xu C Y, Singh V P. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland[J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(3): 197-219
- [39] Alexandris S, Stricevic R, Petkovic S. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula[J]. *European Water*, 2008, 21(22): 17-28
- [40] Jensen M E, Haise H R. Estimating evapotranspiration from solar radiation[J]. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 1963, 89: 15-41
- [41] Trajkovic S, Kolakovic S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(14): 3057-3067
- [42] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92
- [43] 杜加强, 熊珊珊, 刘成程, 郭扬, 舒俭民, 张林波. 黄河上游地区几种参考作物蒸散量计算方法的适用性比较[J]. *干旱区地理*, 2013, 36(5): 831-840  
Du J Q, Xiong S S, Liu C C, Guo Y, Shu J M, Zhang L B. Comparison of models for estimating reference crop evapotranspiration in the headwater catchment of Yellow River basin, China[J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(5): 831-840 (in Chinese)
- [44] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 李新, 马明国, 王介民. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 714-723  
Wang W Z, Xu Z W, Liu S M, Li X, Ma M G, Wang J M. The characteristics of heat and water vapor fluxes over different surfaces in the Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 714-723 (in Chinese)
- [45] 张敏. 希拉穆仁草原地蒸散量特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014  
Zhang M. Research on evapotranspiration characteristics of Xilamuren desert-steppe [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Normal University, 2014 (in Chinese)
- [46] 邹磊, 夏军, 马细霞, 曾思栋. 潜在蒸散发量估算方法在河南省的适用性分析[J]. *水文*, 2014, 34(3): 17-23  
Zou L, Xia J, Ma X X, Zeng S D. Applicability of potential evapotranspiration methods in Henan province[J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(3): 17-23 (in Chinese)
- [47] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 赵芳芳. 基于辐射的潜在蒸散量估算方法适用性分析[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(4): 565-574  
Zuo D P, Xu Z X, Cheng L, Zhao F F. Assessment on radiation-based methods to estimate potential evapotranspiration[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(4): 565-574 (in Chinese)
- [48] 徐俊增, 彭世彰, 丁加利, 魏征. 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾量计算方法评价[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1497-1505  
Xu J Z, Peng S Z, Ding J L, Wei Z. Evapotranspiration of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration based on lysimeter grass experiments [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(12): 1497-1505 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅