水　利　学　报

2019年2月　SHUILI　XUEBAO　第50卷　第2期

文章编号:0559-9350(2019)02-0242-10

基于温度效应的作物系数及蒸散量计算方法

王振龙[1]，顾　南[2]，吕海深[2]，胡永胜[1]，朱永华[2]，杨　秒[2]

（1. 淮河水利委员会 水利科学研究院，安徽 蚌埠　233000；2. 河海大学，江苏 南京　210098）

摘要：准确估算作物蒸散量对于制定合理的灌溉计划和提高水资源利用效率至关重要。为反映逐日需水量的动态变化，考虑温度对作物生长状态的影响，采用三基点温度(最适温度、上限温度、下限温度)计算作物系数及蒸散量，并对不同时间尺度上计算精度进行评价。利用五道沟水文实验站大型称重式蒸渗仪实验资料及气象资料，建立了全生育期冬小麦和夏玉米蒸散量模型，结果表明：通过温度模拟冬小麦和夏玉米作物系数变化拟合度均较高，相关系数均达0.80以上，平均绝对误差均约为0.10；不同时间尺度(1、3、5 d)，蒸散量模型均具有良好的预报能力，冬小麦预测值与实测值相关系数分别为0.95、0.98、0.98，夏玉米为0.90、0.94、0.97。随着时间尺度由1 d升至5 d，冬小麦绝对误差由0.67 mm·d^{-1}降至0.41 mm·d^{-1}，预报准确率(<1 mm·d^{-1})由73%升至90%，夏玉米绝对误差由0.94 mm·d^{-1}降至0.37 mm·d^{-1}，预报准确率(<1 mm·d^{-1})由67%升至90%，预报精度提高。

关键词：温度效应；作物系数；实际蒸散量；参考作物蒸散量；时间尺度；预报模型

中图分类号：S274　**文献标识码：**A　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20180792

1　研究背景

农田实际蒸散量直接反映了作物的需水情况，确定准确的蒸散量对于制定灌溉计划、监测农田旱情、提高水分利用率具有重要意义。

计算作物蒸散量的方法很多，最常用的是作物系数法。作物系数是实际作物蒸散量与参考作物蒸散量的比值，综合反应了土壤与植被对蒸散量的影响。目前，作物系数一般由下述方法计算：一是根据联合国粮食及农业组织(FAO)推荐方法[1-2]，以常数或两常数间线性函数模拟作物系数；二是基于生长性状指标计算所得，如作物覆盖度、株高、叶面积等[3-5]。这些指标1～4周测量1次。若需反映逐日生长状态变化，常使用插值法计算逐日值。这两种方法均不利于反映逐日作物需水量的动态变化，并且方法二在缺乏作物长势资料地区，难以使用。相关研究表明：温度是影响作物生长发育的主导因素，作物生长性状均受温度影响。已有少数学者基于“积温学说”[6]使用累积温度模拟作物系数，如李迎通过累积日均温[7]、梁文清通过活动积温[8]拟合作物系数变化过程。但这些计算方法多是采用数值拟合形式，少有提出物理意义明确的计算模型。实则已有研究将逐日温度与作物生长模型相结合，模拟作物生长趋势变化[9-12]。因此，本文尝试结合黄冲平提出的温度效应模型[9]，考虑三基点温度(最适温度、上限温度、下限温度)对作物生长状态的影响计算作物系数，从而计算蒸散量，并利用大型称重式蒸渗仪实测数据评价不同时间尺度(1、3、5 d)计算结果的适用性、可靠性，以期为准确地计算蒸散量及制定科学合理的灌溉计划提供依据。

收稿日期：2018-08-30

基金项目：国家重点研发计划课题(2017YFC0404504)；国家自然科学基金项目(41830752，41571015)

作者简介：王振龙(1965-)，博士，教授级高级工程师，主要从事水文水资源实验研究。E-mail：skywzl@sina.com

通讯作者：顾南(1995-)，硕士生，主要从事水文水资源统计与分析研究。E-mail：nanguskrskr@163.com

2 实验概述及资料选取

2.1 实验区概况 实验区为五道沟水文实验站，该站地处淮北平原南部，属温带半湿润季风气候。冬季干旱少雨，夏季炎热多雨，降雨量年际变化大，年内分配很不均匀。由1986—2017年实测数据得：多年平均降雨量912.9 mm，多年平均蒸发931.8 mm，多年平均温度15.1 ℃，历年最高气温40.6 ℃，历年最低气温-22.7 ℃，多年平均饱和差4.96 mb，多年平均相对湿度78.98%，多年平均日照时数1711.2 h，多年平均风速（地面上1.5 m高度）1.6m·s^{-1}。农作物以小麦、大豆、玉米为主。土壤主要类型为砂姜黑土（54%）和黄潮土（33%）。砂姜黑土以形状、色泽似生姜而命名，其土壤粒径0.01~0.05 mm的占40%，粒径0.005~0.001 m占25% 。土壤容重0 ~ 10 cm为1.25 g·cm^{-3}，10 ~ 20 cm为1.45 g·cm^{-3}，20 ~ 30cm为1.41 g·cm^{-3}，30 ~ 40 cm为1.46 g·cm^{-3}。凋萎含水率为10% ~ 13%，田间持水率为28% ~ 30%（以上均为重量含水率）。

2.2 实验设施及资料选取 本实验以淮北平原区分布广泛的砂姜黑土为研究对象，利用大型称重式蒸渗仪模拟研究种植典型作物冬小麦和夏玉米情景下蒸散量的变化。生育期内作物水分供给为自然降雨，无补充灌溉。小麦播种量为225 kg/hm^2，行距28 cm。玉米播种密度为75 000棵/hm^2，行距60 cm。蒸渗仪型号为FR101A，分辨率为0.025 mm，口径面积4.0 m^2，土柱高4.0 m。蒸渗仪内土壤从当地大田中按10 cm一层分层挖出，分层拌匀后再按原状土容重依次回填，并放置一年进行自然密实后投入使用。实验期间自动采集重量数据，10 min/次。考虑该区为地下水浅埋区，根据五道沟蒸渗仪群（地下水位埋深范围0 ~ 5 m）实验成果，适宜作物生长的埋深为0.8 ~ 1.5 m，故蒸渗仪内埋深设为1 m。蒸渗仪上方设有摄影机每日自动采集筒内作物生长图像，1 h/次。10、30、50、100和200 cm埋深处分别设有TDR（时域反射仪）测量体积含水率，1 h/次。蒸渗仪南侧高2 m处设有高精度气象站，可获取包括净辐射Rn，土壤热通量G，温度T，空气湿度RH，风速u_2等气象数据，10 min/次。

冬小麦于2017年11月10日播种，次年5月30日收割。夏玉米于2018年6月22日播种，10月9日收割。蒸渗仪资料时段选取2017年11月11日至2018年10月9日，及同期高精度气象站数据。

2.3 生长阶段划分 参考FAO推荐标准作物系数时段划分表，将作物生育期划分为4个生长阶段：初期、发育期、中期和后期。初期为作物生长早期，土壤基本没有被作物覆盖；发育期从初始生长阶段结束到作物基本覆盖土壤表面；中期阶段从充分覆盖到开始成熟；后期从中期结束到收获[13-14]。结合每日采集作物生长图像，现将冬小麦和夏玉米各生长阶段划分如表1所示：

表1 冬小麦和夏玉米作物生长阶段划分

	初期	发育期	中期	后期
小麦	11月10日—次年1月31日	2月1日—4月1日	4月2日—5月4日	5月5日—5月30日
玉米	6月23日—7月15日	7月16日—8月19日	8月20日—9月12日	9月13日—10月8日

3 模型构建及评价指标

实际蒸散量主要受气象、土壤和作物的影响，可通过下式计算[14]：

$$ET = ET_0 \cdot Ks \cdot Kc \tag{1}$$

式中：ET为实际蒸散量，mm·d^{-1}；ET_0为参考作物蒸散量，mm·d^{-1}；Kc为作物系数；Ks为土壤水分胁迫系数。本文蒸散量以小时为步长计算，日蒸散量为小时累积值。根据中国气象局规定，令当日8:00—翌日8:00为一日。

3.1 蒸散量及土壤水分胁迫系数计算方法 实际蒸散量ET由大型称重式蒸渗仪测得，前后两次采集蒸渗仪总重量之差即为该时段ET。其基本原理如下：

$$P + I + Eg = Pa + ET + R + \Delta S \tag{2}$$

式中：P为降水量，mm；I为灌溉量，mm；Eg为潜水蒸发量，mm；Pa为深层土层渗漏量，mm；ET为蒸腾蒸发量，mm；R为径流量，mm；ΔS为土壤蓄变量，mm。

上式左边为输入项，右边为输出项。一般非洪水年份，径流量R为0，可忽略。Eg和Pa依据马氏瓶原理测得，灌溉量I为0，故式(2)可简化为：

$$ET = P + Eg - Pa - \Delta S \tag{3}$$

参考作物蒸散量ET_0的计算方法很多，本文采用标准化、统一化后的FAO Penman-Monteith公式，各参数计算方法见文献[15]。

土壤水分胁迫系数Ks反映了土壤水分对蒸散量的影响，由下式计算[16]：

$$Ks_i = \begin{cases} 0 & \theta_i \leqslant \theta_w \\ \dfrac{\theta_i}{\theta_f} & \theta_\omega < \theta_i < \theta_f \\ 1 & \theta_i \geqslant \theta_f \end{cases} \tag{4}$$

其中，

$$\theta_i = \frac{\theta_{10i} + \theta_{30i}}{2\rho_b} \tag{5}$$

式中：Ks_i为第i天土壤胁迫系数；θ_i为第i天0～40 cm的平均土壤重量含水率；θ_{10i}和θ_{30i}分别为第i天蒸渗仪内10 cm和30 cm处平均体积含水率；ρ_b为0～40 cm的土壤容重，本文取1.4 g/cm^3；θ_w为凋萎含水率10%；θ_f为田间持水率28%。

3.2 作物系数模型构建

3.2.1 基本模型 作物系数K_c反映了作物生长情况。目前，作物系数的计算一般基于生长性状指标。但相关研究表明：温度是影响作物生长发育的主导因素，作物生长性状均受温度影响。为模拟作物生长发育动态过程，黄冲平提出了温度效应模型[9]，本文利用该模型结构，考虑三基点温度对作物生长状态的影响，提出逐日作物系数的计算公式。

黄冲平温度效应模型反映了作物生长发育对不同温度的响应量，模型式如下：

$$TF_i = \mathrm{e}^{-\left(\frac{T_i - T_0}{\beta}\right)^2} \tag{6}$$

其中，

$$T_i = \frac{T_{\max i} + T_{\min i}}{2} \tag{7}$$

式中：TF_i为第i天对温度的响应量；T_i为第i天的平均温度，取当天最高温度和最低温度的平均值；T_0为作物生长、光合作用等生理生态过程的最适温度；β为待估参数。

利用上述模型结构，可用逐日温度响应量乘以最适温度下的作物系数得到逐日作物系数：

$$Kc_i = K_0 \mathrm{e}^{-\left(\frac{T_i - T_0}{\beta}\right)^2} \tag{8}$$

式中：Kc_i为第i天作物系数；K_0为最适温度下的作物系数。K_0反映了理论上作物系数可达最大值，而$\mathrm{e}^{-\left(\frac{T_i - T_0}{\beta}\right)^2}$则反映了温度对作物生长的抑制程度。

由“极值定理”得：当T_i=T_0时，Kc取得极大值K_0，即当温度达到最适温度时，作物生长发育最快，作物系数达到最大；当温度低(高)于最适温度时，对作物生长起抑制作用，作物系数减小。

温度效应模型仅考虑了最适温度，实则作物生长受三基点温度影响。温度高于上限温度或低于下限温度时不利于作物的生长，被称为无效温度。故本文在计算日均温度时，选择目前国内外流行的剔除无效温度新方法，计算如下[17-18]：

$$T_i = \frac{T'_x + T'_n}{2} \tag{9}$$

上式各参数具体计算方法如下：

$$T_x=\max\left(T_{\max},\ T_{\text{base}}\right),\ T_n=\max\left(T_{\min},\ T_{\text{base}}\right),\ T'_x=\max\left(T_x,\ T_{\text{upper}}\right),\ T'_n=\min\left(T_n,\ T_{\text{upper}}\right)$$

式中：T_{base}为下限温度；T_{upper}为上限温度。当该日不存在无效温度时，式(9)即为式(7)。

对于一些温度三基点不对称的作物，式(8)显然具有明显的对称性，可分段确定参数值模拟生长状态。

3.2.2 参数估计 模型式(8)中K_0、T_0和β一般不可知，可结合最小二乘法和序列二次规划法估算各生长阶段参数值，步骤如下：

第一步，全生育期共有n组样本数：(T_i，Kc_i)，i=1，2，3，…，n，Kc_i实际值由下式计算：

$$Kc_i=\frac{ET_i}{ET_{0i}\cdot Ks_i} \tag{10}$$

第二步，对式(8)两边求对数得：

$$\ln\left(Kc_i\right)=\ln\left(K_0\right)-\left(\frac{T_i-T_0}{\beta}\right)^2 \tag{11}$$

整理式(11)得：

$$\ln\left(Kc_i\right)=\ln\left(K_0\right)-\frac{T_0^{\ 2}}{\beta^2}+\frac{2T_0}{\beta^2}\cdot T_i-\frac{1}{\beta^2}\cdot T_i^{\ 2} \tag{12}$$

令$a_0=\ln\left(k_0\right)-\frac{T_0^{\ 2}}{\beta^2}$，$a_1=\frac{2T_0}{\beta^2}$，$a_2=-\frac{1}{\beta^2}$，$x_{2i}=T_1^{\ 2}$，$x_{1i}=T_i$，$y_i\ \ln\left(Kc_i\right)$，式(12)可转换为：

$$y=a_0+a_1\cdot x_i+a_2\cdot x_2 \tag{13}$$

第三步，根据全生育期的n组样本数，上述模型可表示为：

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \tag{14}$$

令$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$，$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} \end{pmatrix}$，$\boldsymbol{Y}=\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$，则式（14）可表示为：

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{XA} \tag{15}$$

利用最小二乘法对整个生育期内参数值估计得：

$$\widehat{\boldsymbol{A}}=\left(\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X}\right)^{-1}\boldsymbol{X}'\boldsymbol{Y} \tag{16}$$

反解式(16)得：

$$\begin{cases} \widehat{\beta}=\sqrt{-\dfrac{1}{\widehat{a}_2}} \\ \widehat{T}_0=-\dfrac{\widehat{a}_1}{2\cdot\widehat{a}_2} \\ \widehat{K}_0=\mathrm{e}^{\widehat{a}_0-\frac{\widehat{a}_1^2}{4-\widehat{a}_2}} \end{cases} \tag{17}$$

第四步，为较准确地估算作物系数，现将其转换为非线性规划问题求解。序列二次规划法将复杂的非线性规划问题转化为较简单的二次规划问题求解，是目前求解非线性规划问题有效方法之一，具有全局收敛性和局部超线性收敛性等优点。将生育期划分为不同生长阶段，以式(17)所得值为初始值，令目标函数为：

$$\min\sum_{i=1}^{n}\left(\widehat{K}\ c_i-Kc_i\right)^2 \tag{18}$$

约束条件为：

$$\begin{cases}\beta > 0 \\ 0 < K_0 < 2 \\ T_{\text{base}} < T_0 < T_{\sup per}\end{cases} \tag{19}$$

基于SPSS软件利用序列二次规划法搜索求得不同生长阶段各参数最优解，估算完毕。

3.3 评价指标 评价指标包括平均绝对误差MAE、均方根误差$RMSE$、相对误差RE、相关系数r和一致性指数d_{IA}，用以评价各计算方法与实测结果之间的误差及一致性情况。另外，采用预报准确率进行评价，定义绝对误差在1 mm·d^{-1}或者2 mm·d^{-1}以内的样本个数占总样本个数的百分比为相应预报准确率。各指标计算公式如下：

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - y_i\right|}{n} \tag{20}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - y_i\right)^2}{n}} \tag{21}$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left|x_i - y_i\right|}{\sum_{i=1}^{n} y_i} \times 100\% \tag{22}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}} \tag{23}$$

$$d_{IA} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - x_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|c_i - \bar{y}\right| + \left|y_i - \bar{y}\right|\right)^2} \tag{24}$$

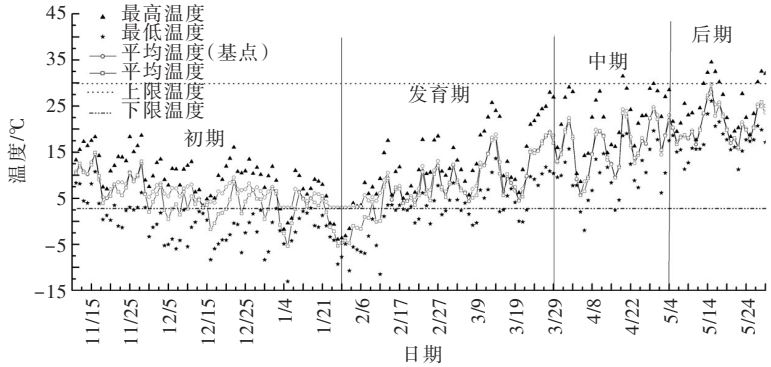
式中：x_i为ET_0模型计算值；y_i为ET实际值；i为样本序数，i=1，2，…，n；$\bar{x}$为计算值的均值；$\bar{y}$为实际值的均值；n为计算值的样本数。

通常计算的误差（MAE、$RMSE$和RE）越小，预报准确率越大，计算方法表现越好。相关系数r和一致性指数d_{IA}越接近于1，表明实际值与模型计算值越接近，模型的预测能力越强。

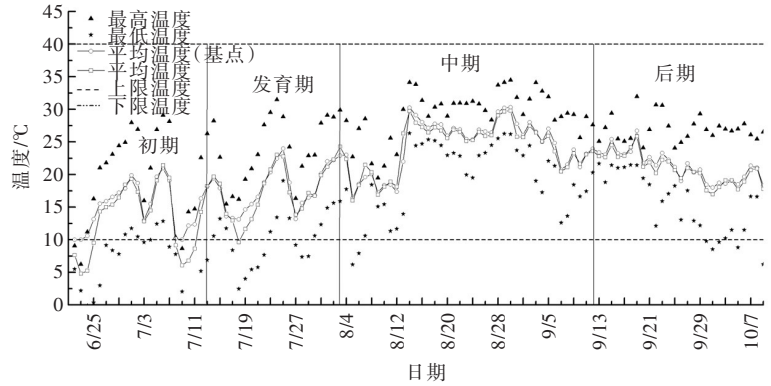
4 结果与分析

利用2017—2018年大型称重式蒸渗仪实验资料及气象资料对冬小麦和夏玉米作物系数模型中参数率定。综合文献资料[18-21]，现分别选取3 ℃和30 ℃作为全生育期小麦下限温度及上限温度，10 ℃和40 ℃为玉米下限温度及上限温度。

冬小麦和夏玉米全生育期气温变化过程线如图1，对比式(9)计算所得平均气温（基点）和气象站每10 min自动采集气温日平均值（简称平均温度）得：小麦生长初期及玉米生长初期—发育期逐日最低温基本低于下限温度，无效温度多，平均温度（基点）振荡幅度小于平均温度，表明平均温度（基点）更能反映前期作物生长缓慢情况；其他时段无效温度少，平均温度（基点）与平均温度趋势基本一致。全生育期小麦作物系数与温度呈正相关性，与平均温度相关系数为0.65，与平均温度（基点）达0.79。而玉米初期与温度呈负相关，发育期—后期呈正相关，这与刘月娥等[22]研究相一致。初期作物系数与平均温度相关系数为-0.34，与平均温度（基点）达-0.45。发育期—后期，8月中下旬约持续强风强降雨，玉米生长异常、对温度响应不明显。剔除降雨日后，该时段作物系数与平均温度相关系数为0.71，与平均温度（基点）达0.75。综上，平均温度（基点）考虑了基点温度对作物生长的影响，更



(a)冬小麦全生育期气温变化过程线



(b)夏玉米全生育期气温变化过程线

图1　冬小麦和夏玉米全生育期气温变化过程线

能有效模拟作物系数的变化，真实反映作物生长情况。

4.1　冬小麦作物系数及蒸散量计算　利用最小二乘法估算式(13)中参数并联合式(17)反解K_0、T_0、β依次为：0.89、25.35、13.63，拟合优度为0.68。以该结果为初值，利用序列二次规划法搜索不同生长阶段各参数最优解，结果见表2。全生育期最适温度下作物系数K_0呈先增后减。生长初期，田间基本无植被覆盖，小麦需水少，K_0最小；发育期小麦返青基本结束，小麦开始拔节，需水增加，K_0相应增大；中期小麦处于孕穗、灌浆状态，需水最大，K_0达到峰值；后期小麦基本成熟，需水减小，K_0降低。最适温度T_0在[24，30]变化，呈上升趋势，这与赵峰等[23]对小麦生育期内最适温度研究所得规律相符。

表2　冬小麦不同生长阶段各参数最优解

	K_0最优解	T_0最优解	β最优解	残差平方和
初期	0.27	24.38	17.68	0.16
发育期	0.86	26.02	16.34	0.86
中期	1.58	27.79	21.05	1.23
后期	1.17	29.41	12.27	1.56

图2比较了冬小麦全生育期利用上表计算所得作物系数K_c及实际值。预测值与实际值相关系数达0.94，平均绝对误差约为0.10，说明预测值精度较高，能很好地反映实际值变化。

图3为依据式(1)计算所得冬小麦不同生长阶段蒸散值与蒸渗仪实测值对比图。ET的预测值与实际值变化趋势基本一致：生长初期先减小后稍有增大，发育期快速增长，中期达到峰值，后期逐渐减小。各生长阶段实际/预测蒸散量平均值(mm·d^{-1})依次为：0.75/0.71、2.40/2.28、7.78/7.88、4.61/4.48，相关系数依次为：0.71、0.90、0.88、0.85，MAE(mm·d^{-1})依次为0.29、0.66、1.10、1.35。除生长初期预测精度相对较差，其余三阶段均精度较高。结合图1(a)可知，生长初期小麦处于越冬阶段，无效温度过多，拟合精度相对较差。非雨期和雨期实际/预测值(mm·d^{-1})依次为3.19/3.14、2.21/2.15，MAE(mm·d^{-1})依次为0.60、0.62。非雨期相对误差RE约19%，而雨期约28%。显然，降雨期间预测

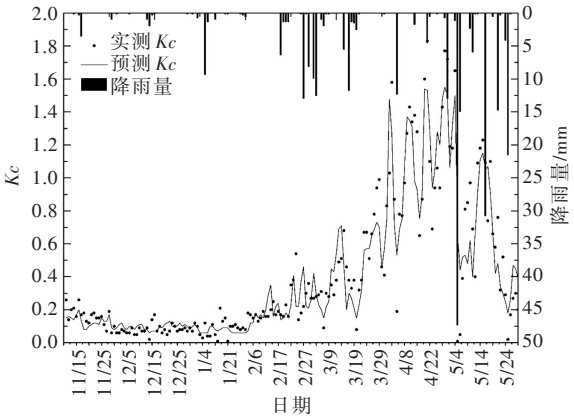
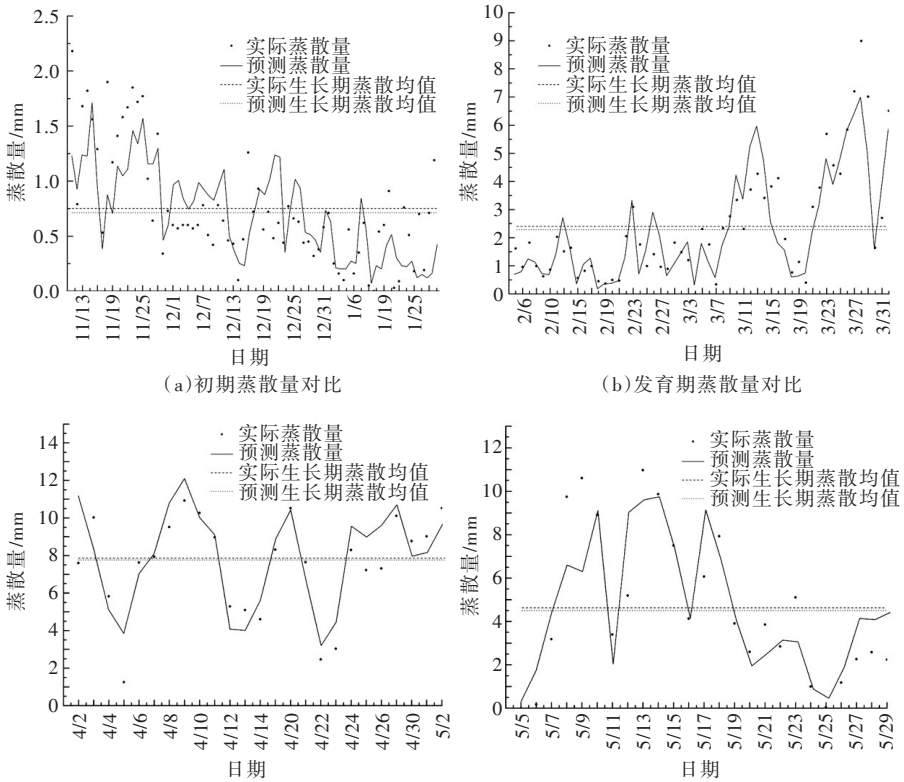


图2　冬小麦全生育期计算 Kc 与实际值比较



(a)初期蒸散量对比　(b)发育期蒸散量对比

(c)中期蒸散量对比　(d)后期蒸散量对比

图3　冬小麦不同生长阶段计算 ET 与实际值对比图

值低于实际值，预测精度低于非雨期。

4.2　夏玉米作物系数及蒸散量计算　参考3.2节中作物系数模型构建方法，估得 K_0、T_0、β 依次为：0.64、29.92、10.39，拟合度为0.64，以该结果为初值，搜索得不同生长阶段各参数最优解，结果见表3。全生育期 K_0 呈先增后减，T_0 在[20，40]呈先降后升再降趋势，这与赵倩[21]研究规律相一致。

表3　夏玉米不同生长阶段各参数最优解

	K_0最优解	T_0最优解	β最优解	残差平方和
初期	0.22	25.06	28.82	0.16
发育期	0.71	20.00	9.28	1.13
中期	1.01	37.42	16.47	0.35
后期	0.70	35.00	12.68	0.19

图4比较了夏玉米全生育期计算所得 Kc 及实际值。预测值与实际值相关系数达0.83，平均绝对误差约0.12，预测值精度较高。

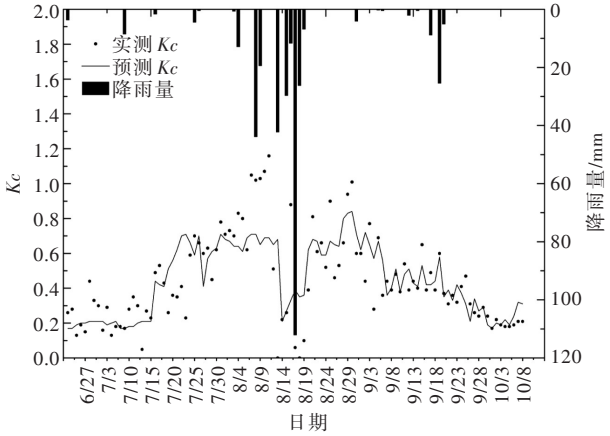


图4　夏玉米全生育期计算 K_c 与实际值比较

图5为夏玉米全生育期蒸散值计算值与实测值对比图。*ET*预测值与实际值变化趋势基本一致。各生长阶段实际/预测蒸散量平均值(mm·d^{-1})依次为：1.83/1.68、4.18/4.10、6.51/6.70、3.61/3.71，相关系数依次为：0.60、0.82、0.83、0.87，MAE(mm·d^{-1})依次为0.29、0.66、1.10、1.35。除生长初期预测精度较低外，发育期—中期时段内，8月7日—8月18日降雨量高达112.20 mm·d^{-1}，风速高达7.47 m·s^{-1}，玉米倒伏严重、生理机能受到扰乱，致使倒伏期间预测值偏小、精度较低。全生育期内非雨期和雨期实际/预测值(mm·d^{-1})依次为4.17/4.20、4.04/3.86，*MAE*(mm·d^{-1})依次为0.83、1.02。雨期*RE*约25%，高于非雨期5%，预测精度较低。

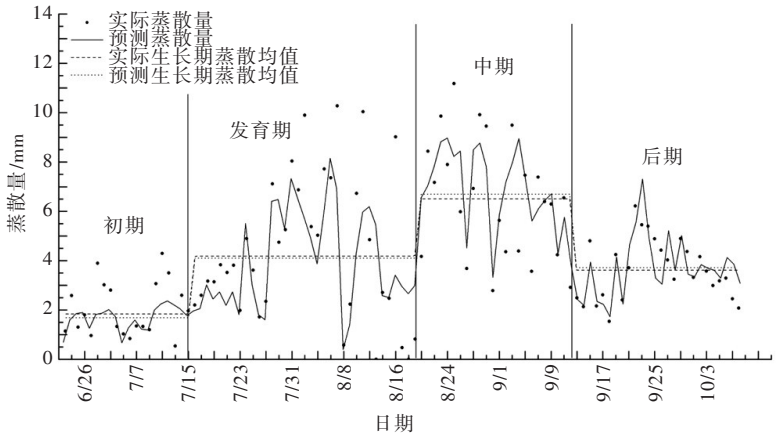


图5　夏玉米不同生长阶段计算 *ET* 与实际值对比

4.3　蒸散模型精度评价　表4为冬小麦和夏玉米不同时间尺度该模型预测精度评价指标结果。冬小麦全生育期平均绝对误差*MAE*为0.67 mm·d^{-1}，预报准确率(*MAE*<1 mm·d^{-1})为73%，误差值较小。相关系数*r*为0.95，一致性指数d_{IA}为0.97，均接近1。夏玉米全生育期*MAE*为0.94 mm·d^{-1}，预报准确率(*MAE*<1 mm·d^{-1})为67%。*r*和d_{IA}均接近1。表明该蒸散量模型具有很好的预报能力，预测精度较高。

随时间尺度由1 d升至5 d，冬小麦和夏玉米的*MAE*和*RMSE*依次减小，*r*、d_{IA}和预报准确率均依次增加，模型预报精度增加。这是因为随着时间尺度的增大，作物需水量的部分正负误差相互抵消，大时间尺度的整体误差因此减小，预测值和实际值的相关关系增强[24]。

5　讨论与小结

考虑温度对作物生长状态影响显著，本文提出一种基于三基点温度计算作物系数的方法，并通过数学推导阐明各参数物理意义。该模型可分段确定K_0、T_0等参数值进行模拟，具有通用性。利用2017—2018年大型称重式蒸渗仪实验资料及气象资料对该模型中参数进行率定及验证，模拟了冬小

表4　冬小麦和夏玉米各时间尺度蒸散量预报精度评价指标值

作物	时间尺度/d	*MAE*/(mm·d^{-1})	*RMSE*/(mm·d^{-1})	误差<1 mm·d^{-1}的预报准确率/%	误差<2 mm·d^{-1}的预报准确率/%	r	d_{IA}
冬小麦	1	0.67	0.99	73	94	0.95	0.97
	3	0.45	0.51	87	98	0.98	0.99
	5	0.41	0.43	90	100	0.98	0.99
夏玉米	1	0.94	1.85	67	89	0.90	0.91
	3	0.51	0.54	80	95	0.94	0.96
	5	0.37	0.41	90	100	0.97	0.98

麦和夏玉米全生育期作物系数的变化，拟合度较高，相关系数均达0.80，平均绝对误差均约0.10。

根据作物系数计算方法所建立的冬小麦和夏玉米蒸散量日预报模型具有较高预测精度。预测值与实际值相关系数均达0.90，一致性指数均达0.90，绝对误差和均方误差均小于2.0 mm·d^{-1}，预报准确率(<1 mm·d^{-1})均达65%，预报准确率(<2 mm·d^{-1})均达85%。

冬小麦和夏玉米蒸散量模型在1、3、5 d三种时间尺度的预报精度均较高，且随预报时间尺度的增大，绝对误差和均方误差依次减小，相关系数、一致性指数和预报准确率依次增加，预报精度增加。本文的作物蒸散模型具有较高的预报能力，能满足农业用水管理、水资源规划的预报要求。

冬小麦和夏玉米蒸散量计算结果基本与实际相符合，但在生长初期和降雨较多时期误差较大，其原因可能与植被覆盖度、气候差异对模型参数的影响有关，需进一步研究。

本文的作物系数计算式具有明显的对称性，对于一些温度三基点不对称的作物，需划分生长阶段确定参数值。文中划分方法是参考FAO推荐标准作物系数时段划分表，实际应用时是否可直观利用作物形态变化划分生长阶段，需进一步研究。

温度是影响作物生长状态基本的气象因素，文中所论述的蒸散模型对作物生长发育的三基点温度(上限温度、最适温度、下限温度)要求是明确的[9]。目前，关于作物三基点温度的研究尚未完全普及。使用该模型计算作物系数时，可参考其他地区研究成果确定三基点温度范围，再进一步搜索求得各参数最优解。考虑到不同地区作物的三基点温度可能存有差异，而文中冬小麦和夏玉米蒸散量模型中各参数是基于安徽省五道沟水文实验站数据所得，其他地区需先率定模型参数或将各参数与已有研究对比后再应用。

淮北平原区属于地下水浅埋区，根据五道沟蒸渗仪群实验成果，适宜作物生长的地下水位埋深为0.8~1.5 m，因此蒸渗仪内埋深设为1 m，并分析计算该情景下作物蒸散量，以此成果指导农田排水系统工程规划，以期将埋深控制在1~1.5 m，既能满足作物需水的天然利用，又能提高水资源的利用率。与大田地下水位同步变化的蒸散量实验有待进一步实施和完善。

参　考　文　献：

[1] 赵娜娜，刘钰，蔡甲冰．夏玉米作物系数计算与耗水量研究[J]．水利学报，2010，41(8)：953-959．

[2] 赵丽雯，吉喜斌．基于FAO-56双作物系数法估算农田作物蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农田为例[J]．中国农业科学，2010，43(19)：4016-4026．

[3] 仝国栋，刘洪禄，李法虎，等．双作物系数法计算华北地区桃树蒸散量的可靠性评价[J]．农业机械学报，2016，47(6)：154-162．

[4] 冯禹，崔宁博，龚道枝，等．基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]．农业工程学报，2016，32(9)：90-98.

[5] PARK Jongmin，BAIK Jongjin，CHOI Minha．Satellite-based crop coefficient and evapotranspiration using surface soil moisture and vegetation indices in Northeast Asia[J]．Catena，2017，156：305-314．

[6] 谢云，JAMES R Kiniry．国外作物生长模型发展综述[J]．作物学报，2002(2)：190-195．

[7] 李迎．基于墒情监测的冬小麦灌溉预报研究[D]．北京：中国农业科学院，2012．

[8] 梁文清 . 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D] . 杨凌：西北农林科技大学，2012 .
[9] 黄冲平 . 马铃薯生长发育的动态模拟研究[D] . 杭州：浙江大学，2003 .
[10] 吕贞龙，徐寿军，庄恒扬 . 作物发育温度非线性效应 Beta 模型的特征分析[J] . 生态学报，2008(8)：3737-3743 .
[11] 黄冲平，张放，王爱华，等 . 马铃薯生育期进程的动态模拟研究[J] . 应用生态学报，2004(7)：1203-1206 .
[12] 沈国权 . 影响作物发育速度的非线性温度模式[J] . 气象，1980(6)：9-11 .
[13] 樊引琴，蔡焕杰 . 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J] . 水利学报，2002(3)：50-54 .
[14] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al . Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirement[R] . Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998 .
[15] 徐俊增，彭世彰，丁加丽，等 . 基于蒸渗仪实测数据的日参考作物蒸发腾发量计算方法评价[J] . 水利学报，2010，41(12)：1497-1505 .
[16] 王晓晨，朱忠礼，季辰，等 . 几种蒸散计算方法在怀来地区的适用性研究[J] . 气象，2016，42(11)：1395-1401 .
[17] ZAHID A，HOWARD N . Response of two-row malting spring barley to water cutoff under sprinkler irrigation[J] . Agricultural Water Management，2009，96(1)：141-148 .
[18] 肖静，李楠，姜会飞 . 作物发育期积温计算方法及其稳定性[J] . 气象研究与应用，2010，31(2)：64-67 .
[19] 齐尚红，王冰洁，武作书 . 农业生产与温度的关系[J] . 河南科技学院学报(自然科学版)，2007(4)：20-23 .
[20] 曹永华，何维勋，朱巨龙 . 温度对玉米营养生长期叶片光合作用强度的影响[J] . 中国农业科学，1985(6)：32-38 .
[21] 赵倩，郭建平 . 不同积温模型的稳定性评估——以东北夏玉米为例[J] . 生态学杂志，2016，35(10)：2852-2860 .
[22] 刘月娥，徐田军，赵久然，等 . 基于称重式蒸渗仪的玉米耗水特性及影响因素研究[J/OL] . 玉米科学，[2018-11-15] . http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1201.S.20181030.1636.020.html .
[23] 赵峰，千怀遂，焦士兴 . 农作物气候适宜度模型研究——以河南省冬小麦为例[J] . 资源科学，2003(6)：77-82 .
[24] 陶国通，王景雷，南纪琴，等 . 基于温度的作物需水量估算方法[J] . 应用生态学报，2014，25(7)：2019-2025 .

Calculation of crop coefficient and evapotranspiration based on temperature effect

WANG Zhenlong[1], GU Nan[2], LÜ Haishen[2], HU Yongsheng[1], ZHU Yonghua[2], YANG Miao[2]
(1. *Water Resources Research Institute of Anhui Province*, *Bengbu* 233000, *China*;
2. *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: It is of great significance to accurately estimate the crop evapotranspiration, for developing sound irrigation plans and improving water use efficiency. To explore the dynamic change of daily water demand, and temperature effect on crop growth, the three-point temperature (optimal temperature, upper limit temperature, lower limit temperature) were applied to calculate crop coefficient and evapotranspiration. The calculation models of evapotranspiration for winter wheat and summer maize were established based on the data of large-scale weighing lysimeters and weather monitoring station in Wudaogou Hydrological Experimental Station. The results show that crop coefficients of wheat and maize simulated through temperature had a high degree of fitness with the measured data. Both correlation coefficients are greater than 0.80 and both average absolute errors are about 0.10. The evapotranspiration model has reliable forecasting ability on different time scales, of 1 d, 3 d and 5 d. The correlation coefficients of wheat are 0.95, 0.98, and 0.98, respectively. With the time scale increasing from 1 d to 5 d, the absolute error decreased from 0.67 $mm \cdot d^{-1}$ to 0.41 $mm \cdot d^{-1}$, the forecast accuracy rate ($<1\ mm \cdot d^{-1}$) increased from 73% to 90%, and the forecast accuracy improved. Simultaneously, maize showed the same law.

Keywords: temperature effect; crop coefficient; actual evapotranspiration; reference crop evapotranspiration; time scale; forecast model

(责任编辑：祁　伟)