

双作物系数模型 SIMDual_Kc 的验证及应用

赵娜娜¹, 刘钰^{1*}, 蔡甲冰¹, L. S. Pereira²

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 葡萄牙里斯本技术大学高等农学院, 里斯本, 1349-017)

摘要: 为了将棵间蒸发与叶面蒸腾有效地分开, 该文利用 3 a 冬小麦的田间实测数据 (土壤含水率和实际腾发量), 率定和验证双作物系数模型 SIMDual_Kc 在华北地区的适用性, 并计算各生育阶段以及整个生育期冬小麦棵间蒸发量占作物腾发量比例。结果表明, 模型模拟土壤含水率及实际腾发量的效果均比较好, 拟合度较高。模型所模拟的棵间蒸发变化过程趋势明显, 与作物生长阶段密切相关, 整个生育期棵间蒸发量占作物腾发量比例在 17%~22% 左右变化, 此模型在华北地区具有一定的适用性。

关键词: 模型, 蒸发, 蒸腾, 作物腾发量, 作物系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.014

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-02-0089-07

赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 双作物系数模型 SIMDual_Kc 的验证及应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 89-95.
Zhao Nana, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Validation and application of dual crop coefficient model SIMDual_Kc[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 89-95. (in Chinese with English abstract)

0 引言

作物需水量是确定作物灌溉制度的基本数据, 是研究农田水分变化规律、农田水利工程规划设计、分析和计算灌溉用水量等的重要依据。作物需水量的计算一般采用作物系数法, 即用作物系数 (K_c) 乘以参照腾发量 (ET_0) 得到作物需水量 (ET_c)^[1-3]。确定作物系数大多采用时段平均单值作物系数法, 这种方法一般用于农田灌溉规划设计及灌溉制度的制定, 而对于农田水分变化规律研究、精细的灌溉管理, 采用双作物系数法可以得到更精确的 ET_c 估算值^[4]。双作物系数法将作物系数 K_c 分为基础作物系数 K_{cb} 和土面蒸发系数 K_e 2 部分, 可以将土面蒸发与叶面蒸腾分开, 并且考虑了降雨和灌水对土壤湿润所造成的影响, 以及保持部分土壤干燥或用覆盖物来控制土面蒸发的影响。国内外许多研究表明, 利用双作物系数法估算作物需水量的精度比较高, 尤其是在地表覆盖度比较小的时候^[4-12]。

灌溉制度的模拟模型一般有 2 种, 一是基于 Richard 方程的水动力学模型, 二是根区土壤水量平衡模型^[13]。SIMDual_Kc 模型是利用双作物系数方法来计算作物需水量和模拟土壤水量平衡, 根据每日的土壤水量平衡来制定灌溉制度的模拟模型。该模型已经在中亚以及葡萄牙的一些地区得以验证和应用^[14-17]。

本文主要采用大兴地区 2006-10-2009-06 冬小麦田

间实测资料率定和验证 SIMDual_Kc 双作物系数模型在华北地区的适用性, 利用该模型计算冬小麦的作物需水量, 并得到基础作物系数和土面蒸发系数, 从而计算冬小麦生育期内叶面蒸腾与棵间蒸发的分摊比例。

1. 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2006-10-2009-06 在位于北京大兴区的中国水利水电科学研究院灌溉试验站进行。该试验站地处北纬 39°37.25', 东经 116°25.51', 海拔 40.1 m。属于半湿润季风性气候, 冬季寒冷干燥, 夏季炎热多雨。试验站土质为沙壤土, 1 m 深平均田间持水率 (θ_{FC}) 为 0.326 m³/m³, 凋萎点 (θ_{WP}) 为 0.128 m³/m³。大兴试验站的气候和土壤条件在华北平原区具有代表性。

1.2 观测项目与方法

1) 气象要素 (降水、大气温度、相对湿度、风速、总辐射和净辐射等): 用位于田间的自动气象站测定, 每 0.5 h 采集一次;

2) 作物腾发量 (ET_c): 用位于田间的大型称重式蒸渗仪测定。其尺寸规格为 2 m×2 m×2.3 m, 测量精度感应量为 0.02 mm, 测定时间间隔为 1 h;

3) 土壤含水率: 采用 TRIME[®]-T3/IPH 土壤水分测量仪测定, 平均每 4d 观测一次, 从表层至 1 m 深处每隔 20 cm 一个测点, 灌水或降雨后加测;

4) 作物生态指标: 作物株高以及叶面积指数利用米尺测其植株高度及叶片的长和宽, 根据折算系数计算作物叶面积指数, 平均每 5 d 观测一次; 冻土期结束后小麦开始返青时开始数据监测;

5) 灌水时间和水量: 灌水由通往田间每个小区的聚氯乙烯 (PVC) 管道及管道首部的流量计控制。灌水量根据实际土壤含水率和平均田间持水率的差值乘以实验

收稿日期: 2010-03-03 修订日期: 2010-12-03

基金项目: 国家“973”计划课题 (2006CB403405); 国家“863”计划课题 (2006AA100208-4)。

作者简介: 赵娜娜 (1985-), 女, 主要进行农田作物耗水规律研究。北京, 中国水利水电科学研究院, 100048。Email: jingshui1985@163.com

*通信作者: 刘钰 (1955-), 女, 教授级高工, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。北京, 中国水利水电科学研究院, 100048。

Email: liuyu@iwhr.com

区面积计算而得，冬小麦各生育阶段灌水量及灌水时间 期作物生长对水分的需求。
见表 1。每年土壤上冻前对冬小麦进行冬灌，以满足冻融

表 1 灌水日期及灌水深度
Table1 Irrigation date and depth

年份	初期		快速生长期		中期		后期	
	日期	灌水深/mm	日期	灌水深/mm	日期	灌水深/mm	日期	灌水深/mm
2006—2007年	2006-11-18	90	2007-04-06	30	2007-04-21	60	2007-06-04	67
2007—2008年	2007-11-15	70	2008-04-05	30	2007-05-07	63	2008-06-03	60
2008—2009年	2008-11-18	60	2009-03-29	60	2009-04-20	70	2009-05-30	60
					2009-05-10	60		
					2009-05-18	50		

6) 冬小麦生育期内每日参照蒸发量 (ET_0) 和降雨量如图 1 所示, 3 a 内冬小麦生育期降雨量分别为: 112.6、208.6 和 114.6 mm。其中 2007—2008 年降水偏多, 其余 2 a 降雨量相对较少, ET_0 年际间差异较小。参照作物腾发量 (ET_0) 根据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算 (Allen 1998), 当有数据缺失时采用 FAO 推荐的气象数据缺失时的 Penman-Monteith 公式计算, 这种方法已在许多地区得以验证^[18], 两者之间的误差很小, 相关性很高。

1.3 SIMDual_K_c 模型

SIMDual_K_c 模型是依据 FAO 双作物系数法来模拟土壤水量平衡的软件, 模型应用了 3 个等级结构: 1) 用户绘图界面 (GUI), 2) 数学模型, 3) 数据库。数据库储存的信息有: 土壤参数、作物参数、地表覆盖特征、径流参数、气象数据、灌溉系统特点等。该模型已经在葡萄牙、地中海沿岸以及中亚的一些地区得以验证。模型计算 ET_c 及模拟土壤水量平衡的过程如下:

1) 土壤特性、气象、作物、径流、覆盖物、地面覆盖以及灌溉系统数据的获取;

2) 根据当地的气象条件和作物种植密度等修正所选定的表中的基础作物系数 K_{cb} 值, 并根据作物生长阶段来计算生育期每日的 K_{cb} 值;

3) 计算每日的 K_e 值, 包括土壤覆盖度 (f_c)、土壤湿润度 (f_w)、裸露的湿润土壤比 (f_{ew})、蒸发递减系数 (K_r) 以及水分胁迫系数 (K_s);

4) 计算每日的 ET_c 和土壤水量消耗。

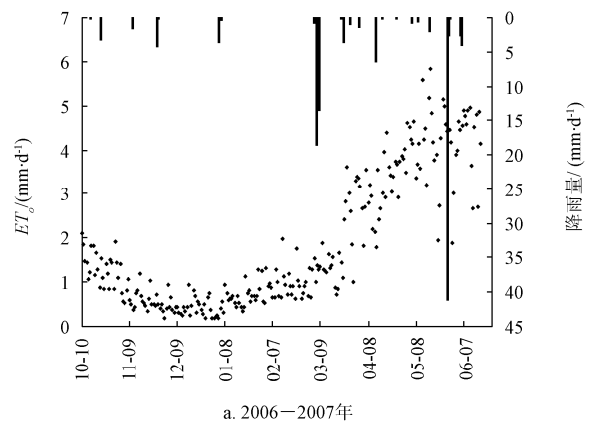
需要输入的数据有:

1) 气象资料, 包括最大和最小温度 T_{min} 和 T_{max} , °C; 日最小相对湿度 RH_{min} , %; 2 m 高处风速 u_2 , m/s; 参照作物腾发量 ET_0 , mm; 有效降雨量 P_e , mm;

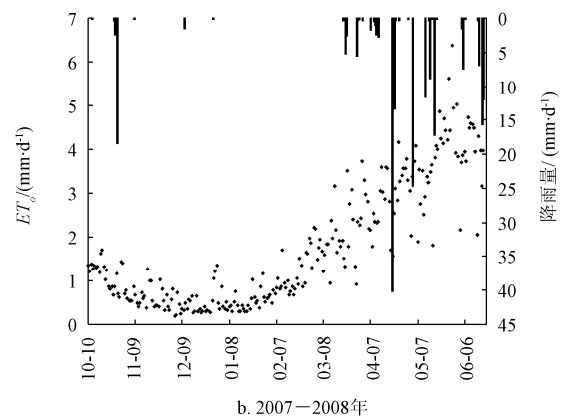
2) 作物数据, 包括种植日期、作物生长阶段天数 L , d; 各阶段基础作物系数 K_{cb} ; 根深 Z_r , m; 最大株高 h_{max} , m; 无水分胁迫条件下各生长阶段的土壤耗水量 θ , m³/m³; 根据覆盖度修正的 K_{cb} 值;

3) 土壤数据, 包括易蒸发水量 REW , mm; 总蒸发水量 TEW , mm; 总有效水量 TAW , mm/m;

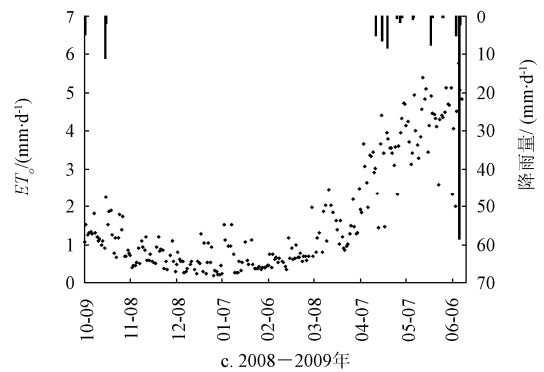
4) 灌溉数据, 包括灌溉系统类型、选项 (无灌溉、当前灌溉制度, 可评价给定的灌溉制度, 每次灌水事件允许的最大灌水深度)。



a. 2006—2007年



b. 2007—2008年



c. 2008—2009年

图 1 冬小麦生育期间每日参照腾发量 ET_0 及降雨变化过程:

Fig.1 Variation of daily ET_0 and precipitation in winter wheat growth period

模型采用了 Allen 等 (2005) 所提出的双作物系数法, 即

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (1)$$

式中, K_c 为综合作物系数, K_{cb} 为基础作物系数, K_e 为土面蒸发系数。计算作物 ET_c 及土面蒸发量 E 和叶面蒸腾量 T 。同时模型在此基础上对土面蒸发系数 K_e 等概念进行延伸^[12], 即将 K_e 分为两部分, 其一是由灌水所引起的土面蒸发系数 K_{ei} , 其二是仅由降雨所引起的土面蒸发系数 K_{ep} ; 根据作物高度、土壤水分消耗系数 p 等计算 K_{cb} 等。模型采用的作物根区土壤水量平衡等式为

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + K_c ET_{o,i} + DP_i \quad (2)$$

式中, $D_{r,i}$ 为第 i 天末根区累积蒸发(消耗)深度, mm; $D_{r,i-1}$ 为第 $i-1$ 天末根区累积蒸发(消耗)深度, mm; P_i 为第 i 天的降雨量, mm; RO_i 为第 i 天的降雨形成地表径流量, mm; I_i 为第 i 天渗入土壤的灌溉深度, mm; CR_i 为第 i 天地下水上升深度, mm; K_c 为综合作物系数; $ET_{o,i}$ 第 i 天参照作物腾发量, mm; DP_i 为第 i 天由于深层渗漏产生的根区损失水量, mm。

1.4 统计参数

采用以下统计参数检验模型的模拟效果:

1) 回归系数 b

$$b = \frac{\sum_{i=1}^m O_i \times P_i}{\sum_{i=1}^m O_i^2} \quad (3)$$

2) 模型有效性系数 EF

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^m (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

3) 一致性指数 d

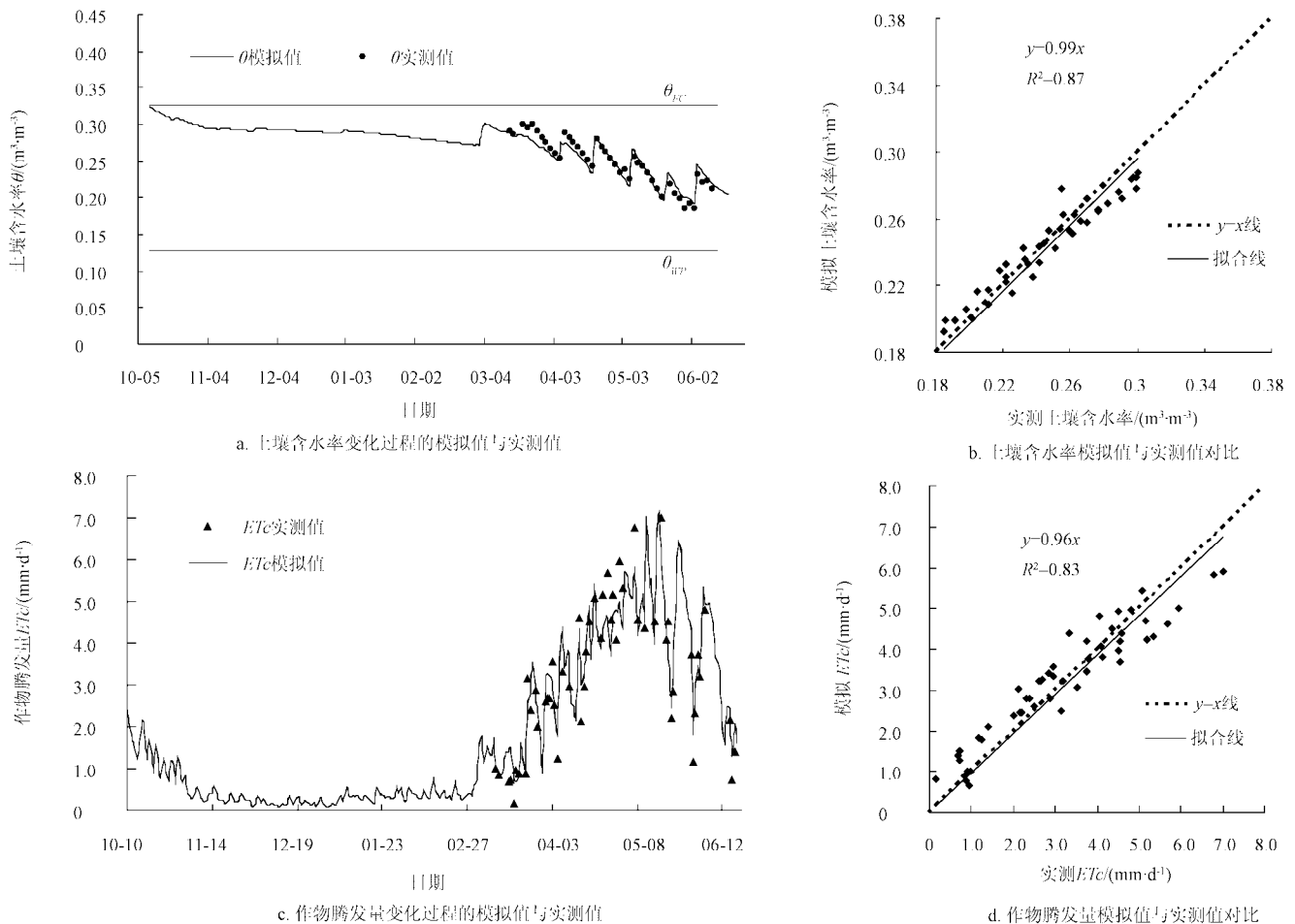
$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^m (|P_i - \bar{P}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (5)$$

其中, O_i 和 P_i 分别为第 i 实测值和预测值; \bar{O} 为 O_i 的平均值 ($i=1, 2, \dots, m$), \bar{P} 为 P_i 的平均值 ($i=1, 2, \dots, m$)。

2 结果与分析

2.1 模型率定

用 2006—2007 年冬小麦的试验数据率定模型参数; K_{cb} 初始值采用的是 Allen 等(1998)推荐值, 并根据当地实际气象条件及作物因素修正。将模型模拟土壤水分与实测土壤水分对比, 两者之间拟合较好, 如图 2 所示。



注: θ_{FC} 为 1m 深平均田间持水率, θ_{WP} 为凋萎点

图 2 2006—2007 年冬小麦生育期土壤含水率和作物腾发量实测值与模拟值对比

Fig.2 Comparison between simulated and observed soil water content and crop evapotranspiration for the wheat growth in 2006—2007

由图 2 及表 2 可以看出, 模型模拟土壤含水率与实测土壤含水率之间拟合度较高, 回归系数为 0.99, 决定系数为 0.87; 两者误差较小, 均方根误差仅为 $0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$, 平均绝对误差 $AAE=0.009$; 模型有效性及一致性指标分别为 0.9 和 0.97, 非常接近 1, 说明该模型可以准确的预测土壤含水率; 模型模拟的 ET_c 与田间实测 ET_c 之间回归系

数达到 0.96, 决定系数为 0.83, 拟合度比较高; 均方根误差为 0.58 mm/d , 平均绝对误差 AAE 为 0.49, 模型有效性系数 EF 达到 0.88, 一致性指标 d 为 0.96, 说明模型预测 ET_c 的精度也较高。

由 2006—2007 年冬小麦的试验数据调试模型所得的参数统计如下:

表 2 实测土壤含水率与模拟含水率以及实测作物腾发量 ET_c 与模拟 ET_c 之间参数统计
Table 2 Statistics of observed and simulated data (soil water content and crop evapotranspiration ET_c)

年份		回归系数 b	决定系数 R^2	均方根误差 $RMSE$ (m^3/m^3)	平均绝对误差 AAE	模型有效性系数 EF	模型一致性指数 d
2006—2007 (率定)	土壤含水率 θ	0.987	0.870	0.010	0.009	0.903	0.970
	作物腾发量 $ET_c/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.960	0.832	0.579	0.490	0.882	0.963
2007—2008 (验证)	土壤含水率 θ	0.980	0.700	0.017	0.014	0.752	0.924
	作物腾发量 $ET_c/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.970	0.849	0.680	0.550	0.804	0.956
2008—2009 (验证)	土壤含水率 θ	1.028	0.800	0.013	0.010	0.661	0.920
	作物腾发量 $ET_c/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	0.880	0.849	0.719	0.570	0.822	0.954

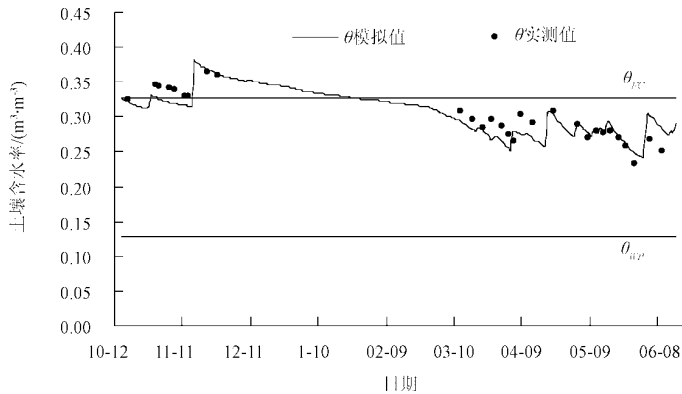
2.2 模型验证

将 2006—2007 年冬小麦所调试的参数 (表 3) 用于 2007—2008 及 2008—2009 年冬小麦数据模型验证中, 验证结果显示模拟水分与实测水分之间一致性良好 (图 3), 回归系数接近于 1, 决定系数在 0.7~0.8 之间变化, 平均绝对误差均小于 0.015, $RMSE$ 变化范围很小 ($0.013\sim 0.017 \text{ m}^3/\text{m}^3$); 表示模型拟合度的 d 值基本接近于 1。这些结果表明模拟水分与实测水分拟合比较好, 当用所率定的参数来模拟冬小麦的土壤水量平衡时精确度比较高, 该模型可以用于预测冬小麦的土壤含水率。

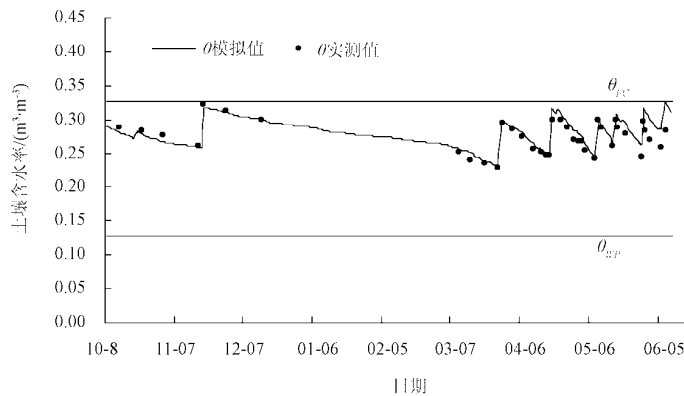
表 3 模型模拟中所采用的作物参数

Table 3 Crop parameters in the model simulation

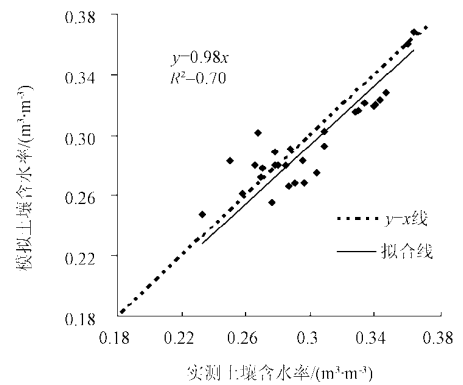
	基础作物系数 K_{cb}	作物高度/m	土壤水分消耗系数 p
初期	0.15	0.1	0.65
冻土期	0.4	0.2	0.65
快速生长期	0.4~1.2	0.2~0.7	0.65~0.55
中期	1.2	0.7	0.55
后期	0.4	0.7	0.6



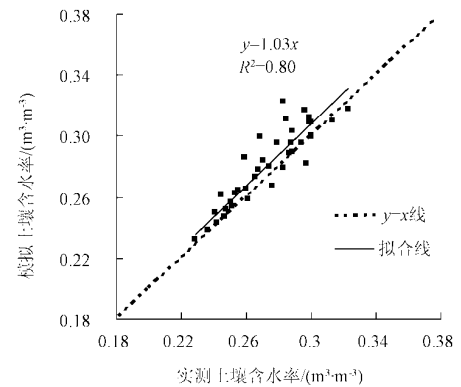
a. 2007—2008年土壤含水率变化过程的模拟值与实测值



c. 2008—2009年土壤含水率变化过程的模拟值与实测值



b. 2007—2008年土壤含水率模拟值与实测值对比



d. 2008—2009年土壤含水率模拟值与实测值对比

图 3 2007—2008 年及 2008—2009 年冬小麦实测含水率与模拟含水率之间对比

Fig.3 Comparison between simulated and observed soil water content for the wheat in 2007—2008 and 2008—2009

模型模拟作物需水量与实测作物需水量之间对比见图 4，统计参数见表 3。由图 4 可以看出，模型模拟作物需水量 ET_c 与实测作物需水量 ET_c 之间趋势一致，拟合较好，回归系数变化范围为 0.88~0.97，决定系数为 0.85，平均绝对误差在 0.55~0.57 mm 之间，均方根误差 $RMSE < 0.72$ mm， $d=0.95$ ， $EF > 0.8$ ，这些统计参数均在合

理范围内，说明模型可以比较准确地预测作物需水量。通过 2007—2008 年及 2008—2009 年冬小麦实测土壤含水率及作物需水量与模型模拟数值之间的对比和验证表明：SIMDual_Kc 双作物系数模型可以比较准确的模拟我国华北地区冬小麦土壤含水率和作物需水量，在我国华北地区具有一定的适用性。

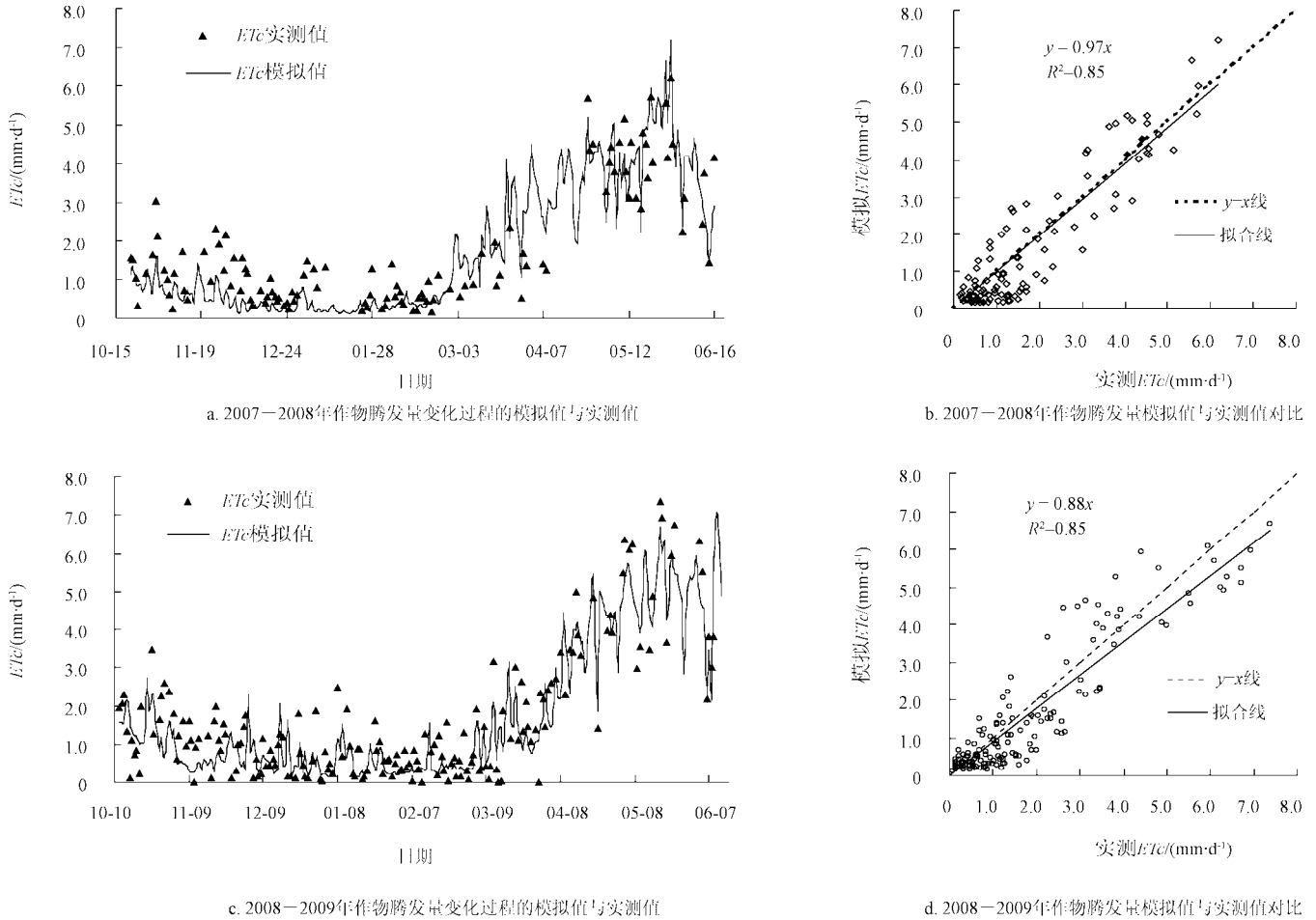


图 4 2007—2008 年及 2008—2009 年冬小麦实测 ET_c 与模拟 ET_c 之间对比

Fig.4 Comparison between simulated and observed crop evapotranspiration ET_c for the wheat in 2007—2008 and 2008—2009

2.3 棵间蒸发占作物腾发量比例 (E/ET) 分析

由双作物系数法可以分别推求出棵间蒸发量 E 和作物叶面蒸腾量 T ，进而可推求作物生育期内棵间蒸发量占作物腾发量比例 (E/ET)。根据该模型分析结果以及田间实测数据计算冬小麦连续 3 a 不同生育阶段棵间蒸发占作物腾发量比例 (E/ET)，见表 4。2007—2009 年冬小

麦各个生育阶段平均棵间蒸发量及叶面蒸腾量变化趋势一致，棵间蒸发量初期最大，随着作物的生长，叶面积指数的增大，棵间蒸发量逐渐减小，后期又有所上升，叶面蒸腾变化过程与棵间蒸发相反，中期作物生长最旺盛时达到最大值。整个生育期内棵间蒸发占作物腾发量比例 (E/ET) 分别为：17.1%、16.6%和 22%。

表 4 冬小麦各生育阶段平均 E 以及 E/ET 变化

Table 4 The average evaporation (E) and E/ET of winter wheat in different growth periods

作物生长阶段	2006—2007 年		2007—2008 年		2008—2009 年		实测 E/ET (%)
	模拟 E (mm·d ⁻¹)	模拟 E/ET (%)	模拟 E (mm·d ⁻¹)	模拟 E/ET (%)	模拟 E (mm·d ⁻¹)	模拟 E/ET (%)	
初期	0.64	81.4	0.75	86.2	0.83	84.9	/
冻土期	0.11	26.5	0.06	18.9	0.11	19.7	/
快速生长期	0.46	19.1	0.31	17.2	0.13	6.4	37.6
中期	0.15	3.2	0.14	3.7	0.16	3.5	18.9
后期	0.39	11	0.61	15.3	1.34	28.4	29.5
全生育期	75	17.1	71.4	16.6	97.9	22	26.6

注： E 为各阶段平均棵间蒸发量，mm/d； E/ET 为各阶段棵间蒸发占作物蒸腾量比例，%。

作物棵间蒸发的试验数据于 2009 年冬小麦返青后布置, 因此表 4 中只给出了 2009 年冬小麦返青后至收获阶段棵间蒸发占作物腾发量的比例。2009 年冬小麦棵间蒸发实测数据与模拟数据的对比结果显示, 小麦快速生长期及中期的实测 E/ET 值明显高于模型模拟值, 后期基本接近, 可能是由于模型在模拟作物棵间蒸发时主要是根据各个生育阶段作物的冠层覆盖度 f_c 模拟计算其变化过程, 模拟过程中 f_c 偏大引起的。同时, 由微型蒸发器所测定的作物棵间蒸发也会有不同程度偏差, 造成实测数据偏大^[19-20]。

3 结 论

通过 2007—2009 年连续 3a 冬小麦实测数据对 SIMDual_Kc 双作物系数模型的率定和验证以及棵间蒸发占作物蒸散发比例分析和研究, 可得出以下几点结论:

1) 双作物系数模型 SIMDual_Kc 可以比较准确地模拟我国华北地区冬小麦的土壤含水率变化过程以及作物需水量的变化;

2) 利用双作物系数模型 SIMDual_Kc 可以估算出作物基础系数 K_{cb} , 华北地区冬小麦生育初期、冻土期、生育中期和生育后期的基础作物系数 K_{cb} 值分别为: 0.15、0.4、1.2 和 0.4;

3) 冬小麦整个生育期内棵间蒸发占总作物腾发量的比例 17%~22% 左右, 其中生育初期所占比例最大, 达到 80% 以上; 然后逐渐下降, 至生育中期棵间蒸发所占比例降至最小, 不足 4%; 生育后期有所上升; 与 2009 年冬小麦棵间蒸发实测数据相比, 模型模拟值在快速生长期及中期偏小;

4) 上述研究是在冬小麦充分供水条件下进行的, 非充分供水条件下该模型的适用性还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] Allen R G, Pereira L S, Martin D S. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. FAO Irrigation and Drainage, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

[2] Doorenbos, J, Pruitt, W O. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements [M]. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1977.

[3] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology, 2000, 229(5): 27—41.

[4] Allen R G, Clemmens, A J, Burt, C M, et al. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 24—36.

[5] 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, 33(3): 50—54. Fan Yinqin, Cai Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach [J]. Journal of Hydraulic

Engineering, 2002, 33(3): 50—54. (In Chinese with English abstract)

[6] Kang Shaozhong, Gu Binjie, Du Taisheng, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59:239—254.

[7] Li Yulin, Cui Jianyuan, Zhang Tonghui, et al. 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.

[8] 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[J]. 水利学报, 2004(1): 17—21. Peng Shizhang, Suo Lisheng. Water requirement model for crop under the condition of water-saving irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (1): 17—21. (In Chinese with English abstract)

[9] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 191—193. Chen Feng, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Estimation of evapotranspiration and crop coefficients of winter wheat and summer maize in Yangling zone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2006, 22(5): 191—193. (In Chinese with English abstract)

[20] 刘海军, 康跃虎. 冬小麦拔节抽穗期作物系数的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 52—56. Liu Haijun, Kang Yuehu. Calculation of crop coefficient of winter wheat at elongation-heading stages [J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2006, 22(10): 52—56. (in Chinese with English abstract)

[21] 刘钰, Pereira L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26—30. Liu Yu, Pereira L S. Validation of FAO methods for estimating crop coefficients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2000, 16(5): 26—30. (in Chinese with English abstract)

[22] Singh R K, Irmak A. Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009, 135(5): 597—608.

[23] Pereira L S, Perrier A, Allen R G, et al. Evapotranspiration: review of concepts and future trends [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1999, 125(2): 45—51.

[24] Rolim J, Godinho P, Sequeira B, et al. SIMDualKc, a software tool for water balance simulation based on dual crop coefficient [A]. Computers in Agriculture and Natural Resources (4th world congress, Orlando, FL), ASABE, St. Joseph, MI, 2006: 781—786.

[25] Allen R G, Pereira L S, Smith M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 2—13.

[26] Allen R G, Pereira L S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height[J]. Irrigation Science, 2009, 28(1): 17—34.

[27] Rolim J, Godinho P, Sequeira B, et al. Assessing the SIMDualKc

- model for irrigation scheduling simulation in Mediterranean environments, Water saving in Mediterranean agriculture and future research needs [A]. (Proc. Int. Conf. Ciheam/Iamb, Valenzano, Italy, Feb. 14–17, 2007), Options méditerranéennes, Series B, pp. 49–61.
- [28] 刘钰, Pereira L S, Teixeira J L. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 6(3): 27–33.
Liu Yu, Pereira L S, Teixeira J L. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 6(3): 27–33. (in Chinese with English abstract)
- [29] 孙宏勇, 刘昌明, 张喜英, 等. 不同行距对冬小麦麦田蒸发、蒸散和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 22–26.
Sun Hongyong, Liu Changming, Zhang Xiying, et al. Effects of different row spacings on soil evaporation, evapotranspiration and yield of winter wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2006, 22(3): 22–26. (In Chinese with English abstract)
- [30] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 17–22.
Wang Jian, Cai Huanjie, Kang Yanxia, et al. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field [J]. Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2007, 23(4): 17–22. (in Chinese with English abstract)

Validation and application of dual crop coefficient model SIMDual_Kc

Zhao Nana¹, Liu Yu^{1*}, Cai Jiabing¹, L. S. Pereira²

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Institute of Agriculture, Technical University of Lisbon, Lisbon 1349-017)

Abstract: In order to distinguish evaporation and crop transpiration, the dual crop coefficient model, SIMDual Kc, was calibrated and verified based on 3-year data measured from an experimental field of winter-wheat in the North China Plain. Result show that simulated values of evapotranspiration and soil water content fit well with their respective observed data. Simulated evaporation show clear periodic variation, closely related to different phase of crop growth. The ratio of evaporation to the actual crop evapotranspiration in the whole growth is 17%-22%. Consequently, this model is suitable to be used in North China Plain.

Key words: models, evaporation, transpiration, crop coefficient, crop evapotranspiration