

基于 SIMDualKc 模型估算西北旱区冬小麦蒸散量及土壤蒸发量

王子申, 蔡焕杰^{*}, 虞连玉, 王晓文, 石小虎

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100)

摘 要: 为研究西北旱区冬小麦蒸散和土壤蒸发规律, 以及土壤蒸发比例与其影响因子的关系, 利用 2 a 冬小麦小区控水试验实测数据, 对 SIMDualKc 模型进行了参数校正和验证, 对比大型称重式蒸渗仪的实测蒸散量值(或水量平衡法计算值)与模型模拟值。用建立的模型模拟精度评价标准对模拟值和实测值的误差进行评价。用经参数校验的模型模拟冬小麦农田土壤蒸发, 并与微型蒸渗仪的实测值进行对比。基于通径分析方法研究气象因子(最低气温、最高气温、平均相对湿度、2 m 处风速、太阳辐射量)和作物因子(地面覆盖度)与土壤蒸发比例的关系。结果表明, 该研究建立的模型模拟精度评价标准能够较为全面地评价模型精度; SIMDualKc 模型可以较好地模拟西北旱区不同灌溉制度下冬小麦蒸散量和土壤蒸发量的变化过程, 且在模拟长时段累积值时具有较高精度; 拔节-灌浆期是冬小麦的需水关键期, 冬小麦全生育期土壤蒸发比例呈现出生长中期<生长后期<快速生长后期<生长初期的规律; 灌水仅在短时间内影响土壤蒸发, 地面覆盖度是影响土壤蒸发的最主要因子; 在实测数据不充足的情况下, 可以将地面覆盖度和蒸散量作为输入变量, 用该研究确定的土壤蒸发比例与地面覆盖度的回归模型计算土壤蒸发量, 该模型在计算不同水分条件下冬小麦农田土壤蒸发量时表现出较高的计算精度, 决定系数在 0.721~0.902 之间, 可以作为计算土壤蒸发量的简便方法。研究可为西北旱区冬小麦农田节水和灌溉决策提供理论依据。

关键词: 蒸散; 土壤; 模型; 冬小麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.018

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0126-11

王子申, 蔡焕杰, 虞连玉, 王晓文, 石小虎. 基于 SIMDualKc 模型估算西北旱区冬小麦蒸散量及土壤蒸发量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 126—136. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.018 <http://www.tcsae.org>

Wang Zishen, Cai Huanjie, Yu Lianyu, Wang Xiaowen, Shi Xiaohu. Estimation of evapotranspiration and soil evaporation of winter wheat in arid region of Northwest China based on SIMDualKc model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 126—136. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.018 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

蒸散量(evapotranspiration, ET_C)包括植株蒸腾和土壤蒸发两部分, 减少田间的土壤蒸发损失, 是农田节水的重要内容^[1], 因此明确植株蒸腾和土壤蒸发的分配显得尤为关键。

微型蒸渗仪(micro-lysimeter)常与其他测定或计算蒸散量的方法结合, 研究农田土壤蒸发。微型蒸渗仪制作简单, 造价低廉, 近年来广泛应用于农田土壤蒸发的测定。王自奎等^[2]用微型蒸渗仪的实测数据, 结合 Ritchie 模型和间套作群体光能传输模型, 研究了小麦/玉米套作种植模式下的农田土壤蒸发变化规律。刘钰等^[3]用 2 种规格的微型蒸渗仪测定了麦田和裸地的土壤蒸发, 并给出

了土壤蒸发强度和各种影响因素的关系。王健等^[4]用微型蒸渗仪和大型称重式蒸渗仪研究了夏玉米的土壤蒸发比例, 发现气象因素和水分供应对夏玉米的土壤蒸发比例影响较大。微型蒸渗仪具有制作简单、测量简便的优点, 但同时也有研究表明微型蒸渗仪的测量精度会受到材质、尺寸及使用环境等因素的影响。李王成等^[5]探讨了不同材质和尺寸的微型蒸渗仪在西北旱区的适用性, 发现聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)材质且不封底的设计最适用于本地区。Evet 等^[6]研究发现与金属材质的微型蒸渗仪相比, 塑料材质的微型蒸渗仪对筒内土壤的增温效应不是十分明显。高晓飞等^[7-8]认为 70 mm 口径的微型蒸渗仪的测量精度受环境因素影响较大, 但在遮阴或室内条件下也可使用, 50 mm 长的微型蒸渗仪在测量强度不大的土壤蒸发时精度较高。

鉴于微型蒸渗仪的测量精度可能受到各种因素的影响, 双作物系数法^[9]仍是研究作物蒸散和土壤蒸发的重要方法, 国内学者在应用双作物系数法研究作物不同时空尺度蒸散规律方面取得了许多成果^[10-17]。Rosa 等^[18]根据双作物系数法的原理, 开发了双作物系数模型(dual crop coefficient model, SIMDualKc), 该模型以作物指标(作物系数、地面覆盖度、根深度、植株高度等)、土壤指

收稿日期: 2015-09-21 修订日期: 2016-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(51179162); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAD29B01); 高等学校学科创新引智计划(B12007)

作者简介: 王子申, 男, 山西忻州人, 主要从事节水灌溉理论与新技术方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: wangzshen@yeah.net

*通信作者: 蔡焕杰, 男, 河北藁城人, 教授, 主要从事节水灌溉理论与新技术方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院中国旱区节水农业研究院, 712100。Email: caihj@nwsuaf.edu.cn

标(土壤质地、田间持水量、凋萎系数等)、农田管理指标(播种日期、收获日期、灌水量和灌水日期等)为输入参数,可模拟不同作物在不同灌溉制度下的蒸散变化情况。Rosa 等^[19]用该模型模拟了葡萄牙、叙利亚和乌兹别克斯坦等国的玉米、小麦和棉花等作物的蒸散,取得了较高的准确性,并且在部分数据缺失的情况下,利用 FAO56 文件推荐的参数进行模拟,仍然有较高的准确性。赵娜娜^[20-21]、邱让建^[22]及李石琳等^[23]也在 SIMDualKc 模型的参数校验和模拟应用方面做了大量的工作,用 SIMDualKc 模型模拟研究了小麦、玉米和番茄等作物的蒸散规律。模型应用前要先经过校正和验证的过程^[24],先前的研究者在校验 SIMDualKc 模型时,大都是先测定土壤含水率,再依据水量平衡法计算蒸散量,然后与模型的模拟值比较,这种方法得到的蒸散量的实测值不具有连续性,在校验模型时难以做到全面,因此需要更为细致的实测数据。大型称重式蒸渗仪作为一种较精密的仪器,具有测量精度高、操作自动化、可以连续测量等优点,近年来已被广泛应用于作物蒸散的研究中^[25-27]。鉴于蒸渗仪较高的测量精度,其测量数据被许多研究者用作评价新计算方法和模型模拟精度的参考标准。徐俊增等^[27]将蒸渗仪内草坪试验的实测数据作为评价 11 种参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration, ET_0)计算方法的标准。Soldevilla-martinez 等^[28]以称重式蒸渗仪的测量数据为标准,分别评价了农业技术转移决策支持系统(decision support system for agrotechnology transfer, DSSAT)和土壤—作物—渗流水分模型(water and agrochemicals in soil, crop and vadose environment, WAVE)模拟土壤水分平衡时的精度。SIMDualKc 模型作为近年才开发完成的模型,目前将蒸渗仪实测数据用于其模拟精度评价的研究还较少。另外,在选用评价模拟精度的误差统计量时,研究者往往只进行计算和比较,缺乏数学原理上的探讨,选用的误差统计量也各不相同^[19-23],未能建立起完整统一的模型精度评价标准。此外,虽然 SIMDualKc 模型在大田作物上已有不少应用,但是大部分做的是单一灌溉制度的研究,缺乏不同灌溉制度的比较,这就制约了模型评价的全面性。综上,有必要将蒸渗仪引入 SIMDualKc 模型的参数校验过程,建立一套合理的模型模拟精度评价标准,在此基础上用模型模拟和田间实测结合的方式,深入研究冬小麦蒸散及土壤蒸发的规律。

本研究进行 2 a 冬小麦不同灌溉制度的小区控水试验,利用小区控水试验的大型称重式蒸渗仪、土壤水分和微型蒸渗仪等实测数据对 SIMDualKc 模型进行参数校验,建立一套 SIMDualKc 模型精度的评价标准,评价 SIMDualKc 模型估算不同灌溉制度下冬小麦蒸散量和土壤蒸发量的适用性,在此基础上,针对 SIMDualKc 模型存在的输入参数多、参数校验过程繁琐等缺点,用模型输出的土壤蒸发比例(E/ET_c)建立了与地面覆盖度(f_c)的回归模型。旨在为西北旱区冬小麦农田节水和灌溉决策提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

小区控水试验于 2013 年 10 月—2015 年 6 月在西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院农田水分转化试验场的遮雨棚下测坑内进行($108^{\circ}4'E$ 、 $34^{\circ}18'N$,海拔 521 m)。该地区属温带大陆性季风气候。由于设置遮雨棚,忽略冬小麦全生育期降水,2013—2014 年冬小麦全生育期日平均最低气温 $-4.7^{\circ}C$,日平均最高气温 $32.5^{\circ}C$, $>10^{\circ}C$ 的积温 $1\,648^{\circ}C$,太阳辐射量 $2\,789\,MJ/m^2$;2014—2015 年冬小麦全生育期日平均最低气温 $-3.2^{\circ}C$,日平均最高气温 $24.3^{\circ}C$, $>10^{\circ}C$ 的积温 $1\,424^{\circ}C$,太阳辐射量 $2\,787\,MJ/m^2$ 。试验区土壤属中壤土,1 m 土层平均田间持水量 $28\,cm^3/cm^3$,平均凋萎系数 $13\,cm^3/cm^3$,平均土壤干容重 $1.44\,g/cm^3$ 。试验用钢筋混凝土测坑,面积 $6.67\,m^2$,共 27 个,其中 2 个测坑内安装有大型称重式蒸渗仪,进行充分灌水处理作为对照。测坑内土壤用原状土分层回填,相邻测坑间的水泥壁面有效防止水分侧渗,测坑区上方安装有移动式电动遮雨棚阻挡降水,无降水时打开。

1.2 试验设计及过程

冬小麦的灌水定额设置充分、亏水 20%和亏水 40% 3 个灌水水平。充分灌水水平的灌水量由蒸渗仪测定,为 2 次灌水之间的蒸散量,亏水水平的灌水量在充分水平基础上按比例计算。正交组合得 9 个处理,设 3 个重复。

各处理施 N $244\,kg/hm^2$, P_2O_5 $270\,kg/hm^2$,播种时一次性施入。2013—2014 年进行 3 次灌水(生长后期不灌水),2014—2015 年进行 4 次灌水(4 个生育期均灌水)。2014—2015 年播种前各处理灌水 75 mm 以保证出苗,2013—2014 年播种前未灌水,因此为保证冬小麦顺利过冬,基于蒸渗仪测定值 52 mm,灌水量增加 60%,即将 84 mm 作为该年度生长初期充分灌溉的灌水量,亏水水平也按比例增加。2 a 冬小麦灌水组合方案如表 1 所示。

试验用冬小麦品种为“小偃 22 号”,播种量约为 $357\,万株/hm^2$,2013—2014 年于 2013 年 10 月 15 日播种,2014 年 6 月 8 日收获,全生育期共 236 d;2014—2015 年于 2014 年 10 月 20 日播种,2015 年 6 月 3 日收获,全生育期共 226 d。按照 FAO56 文件推荐的生育期划分方法,将作物全生育期划分为生长初期(从播种至地面覆盖度 10%为止)、快速生长期(从地面覆盖度 10%至地面覆盖度 80%为止)、生长中期(从地面覆盖度 80%至作物开始成熟为止)和生长后期(从作物开始成熟至收获为止)^[9],上述 4 个生育期分别对应冬小麦的播种-分蘖期、分蘖-拔节期、拔节-抽穗-灌浆期和灌浆-成熟期。按照以上作物生育期的划分方法,将冬小麦生育期划分如下:2013—2014 年,生长初期 130 d、快速生长期 50 d、生长中期 28 d、生长后期 28 d;2014—2015 年,生长初期 125 d、快速生长期 50 d、生长中期 30 d、生长后期 21 d。

表 1 2013—2015 年冬小麦各处理灌水量

Table 1 Irrigation amount of winter wheat for different treatments in 2013-2015

年份 Year	处理 Treatment	生长初期 Initial stage	快速生长期 Crop development stage	生长中期 Mid season stage	生长后期 Late season stage	全生育期 Whole growth stage
2013—2014 年	T1	84	75	105	/	264
	T2	84	60	84	/	228
	T3	84	45	63	/	192
	T4	67	75	63	/	205
	T5	67	60	105	/	232
	T6	64	45	84	/	193
	T7	52	75	84	/	211
	T8	52	60	63	/	175
	T9	52	45	105	/	202
2014—2015 年	F1	45	67	85	133	330
	F2	36	54	68	106	264
	F3	27	40	51	80	198
	F4	36	67	68	80	251
	F5	36	54	51	133	274
	F6	36	40	85	106	267
	F7	27	67	51	106	251
	F8	27	54	85	80	246
	F9	27	40	68	133	268

注：2013—2014 年生长初期、快速生长期、生长中期分别指 2013 年 12 月 28 日、2014 年 3 月 31 日、2014 年 5 月 8 日；2014—2015 年生长初期、快速生长期、生长中期、生长后期分别指 2015 年 1 月 9 日、3 月 22 日、4 月 24 日、5 月 18 日。

Note: Initial stage, crop development stage, and mid season stage refer to December 28, 2013, March 31, 2014, and May 8, 2014, respectively in 2013-2014; Initial stage, crop development stage, mid season stage, and late season stage refer to January 9, March 22, April 24, and May 18, 2015, respectively in 2014-2015.

1.3 观测指标及观测方法

1) 气象数据：主要包括逐日最高气温 (T_{\max})、最低气温 (T_{\min})、平均气温 (T_a)、相对湿度 (RH)、距地面 10 m 处风速 (u_{10} , m/s)、日照时数 (n , h) 等，从位于试验站内的杨凌国家一般气象站获得，逐日太阳辐射量 (R_s , MJ/(m²·d)) 采用 FAO56 文件的艾斯屈臣 (Angstrom) 公式^[9]计算

$$R_s = (a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}) \cdot R_a \quad (1)$$

式中 N 为最大可能日照时数, h; R_a 为天顶辐射, 根据文献^[9]计算, MJ/(m²·d), a_s 和 b_s 为经验系数, 本文选用 FAO56 文件推荐值, $a_s=0.25$ 和 $b_s=0.5$ ^[9]。

距地面 2 m 处风速用风廓线公式^[9]计算:

$$u_2 = u_{10} \cdot \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)} \quad (2)$$

式中 u_2 为距地面 2 m 处风速, m/s。

冬小麦各生育期的 R_s 和 T_a 如图 1 所示。

用以上获得的逐日气象数据, 采用 FAO Penman-Monteith 方法^[9]计算冬小麦生育期参考作物蒸散量 (ET_0)。

2) 充分灌水条件下的冬小麦蒸散量 (actual evapotranspiration, ET_a): 用大型称重式蒸渗仪 (西安清远测控技术有限公司) 测定, 测量精度 1 g, 每隔 1 h

记录 1 次数据。

3) 土壤含水率 (θ): 2013—2014 年用取土烘干称重法测定, 2014—2015 年用剖面土壤水分传感器 (IMKO Crop., German) 测定, 测定深度 0~1 m, 每隔 10 cm 设置 1 个取样点, 测定时间间隔 5~10 d, 灌水前后加测, 由于设置遮雨棚阻挡降雨, 同时忽略深层渗漏, 因此没有安装蒸渗仪的小区用简化后的水量平衡方程计算蒸散量:

$$Z_r \cdot (\theta_i - \theta_0) = I - ET_C \quad (3)$$

式中 Z_r 为根系活动层深度, mm; θ_i 和 θ_0 分别为时段末和时段初根系活动层的平均体积含水率, cm³/cm³; I 为该时段的灌水量, mm; ET_C 为该时段的蒸散量, mm。

4) 地面覆盖度 (f_c): 拍照法测定, 用直径 60 cm 的铁圈选取小区中植株长势均匀的区域, 用数码相机拍摄被铁圈选定的农田区域, 用 Photoshop 软件分别标定照片中的植被像素和农田像素, 该小区的地面覆盖度约等于植被像素和农田像素的比值。

5) 土壤蒸发量 (E): 用埋设于小区内的自制微型蒸渗仪测定, 微型蒸渗仪高 200 mm, 分内筒和外筒, 内筒用 PVC 管制作, 直径 100 mm, 外筒用铁皮制作, 直径 120 mm, 筒内土壤用原状土分层回填, 上午 10:00 用精度 0.01 g 的电子天平称质量, 越冬期末测定。

6) 株高 (h): 每个处理取有代表性植株 30 株, 用精度为 1 mm 的卷尺量取株高, 取平均值作为该处理本次测量的株高, 每 7 d 测定 1 次。

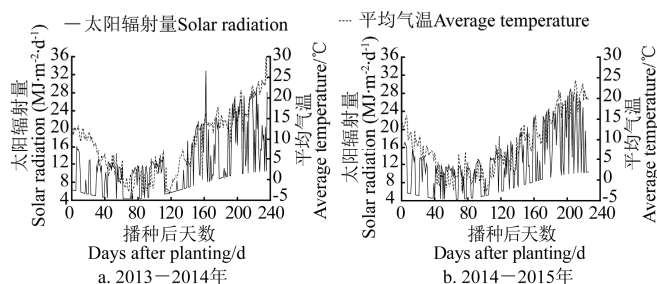


图 1 2013—2014 年和 2014—2015 年冬小麦全生育期日太阳辐射量和平均气温

Fig.1 Daily solar radiation and average temperature during whole growth stage of winter wheat in 2013-2014 and 2014-2015

1.4 SIMDualKc 模型简介及参数校验

SIMDualKc 模型是 Rosa 等^[18]基于双作物系数法开发的计算作物蒸散量的模型。需要输入的数据主要有气象数据、土壤数据 (田间持水量、凋萎系数、土壤干容重)、作物数据 (地面覆盖度、株高、各生育期起止日期)、灌水数据 (灌水定额、灌水日期)。模型运行前需要对基础作物系数 (basal crop coefficient, K_{cb} (初期、中期、后期)、土壤水分消耗比率 p (初期、中期、后期)、蒸发层深度 Z_e 、总蒸发水量 (total evaporable water, TEW) 和易蒸发水量 (readily evaporable water, REW) 等参数进行校正。

本文采用 2013—2014 年和 2014—2015 年充分灌水处理 T1 和 F1 的蒸渗仪实测数据对 SIMDualKc 模型

进行参数校正。模型参数校正按照 K_{cb} 、 p 、 Z_e 、TEW、REW 的顺序，采用试错法（trial and error）进行^[19]。将模型输出的蒸散量与蒸渗仪实测值进行对比，当模拟值与实测值间的误差达到最小时，终止校正。用 2 a 非充分灌溉的 16 个处理进行验证，将冬小麦蒸散量的模拟值与水量平衡法计算值进行对比。当 2 a 所有处理的蒸散量模拟值与实测值（或水量平衡法计算值）误差最小时，结束校验，获得模型适用于本地区的最优参数。

1.5 模型评价

根据前人研究^[19,29]选取回归系数（coefficient of regression, b ）、决定系数（coefficient of determination, R^2 ）、均方根误差（root mean square error, RMSE）、平均绝对误差（average absolute error, AAE）、一致性指数（index of agreement, d_{IA} ）、纳什系数（Nash Sutcliffe efficiency, NSE）和均方根误差/观测值标准差比率（RMSE-observations standard deviation ratio, RSR）评价模型模拟精度。 b 、 R^2 和 d_{IA} 越接近 1，RMSE 和 AAE 越接近 0 时，模拟结果越好。 $0.75 < NSE \leq 1$ ， $0 \leq RSR \leq 0.5$ 时，模拟结果极好； $0.65 < NSE < 0.75$ ， $0.5 < RSR < 0.6$ 时，模拟结果良好； $0.5 < NSE < 0.65$ ， $0.6 < RSR < 0.7$ 时，模拟结果一般； $NSE \leq 0.5$ ， $RSR > 0.7$ 时，模拟结果不可接受。

2 结果与分析

2.1 SIMDualKc 模型参数的校正与验证

2013–2014 年和 2014–2015 年用于参数校正的冬小麦蒸散量模拟值和蒸渗仪实测值的变化曲线如图 2 所示。

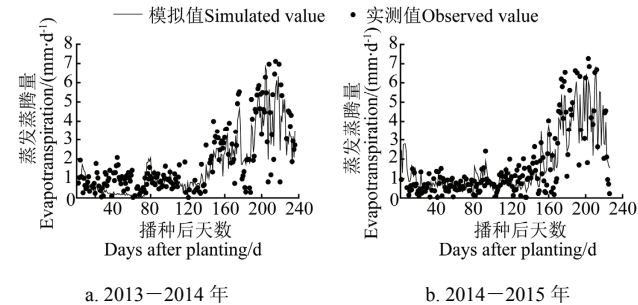


图 2 2013–2014 年和 2014–2015 年冬小麦蒸散量模拟值和实测值对比

Fig.2 Comparison between simulated and observed evapotranspiration of winter wheat in 2013-2014 and 2014-2015

从图 2 可以看出模型模拟的冬小麦蒸散量与蒸渗仪实测值的吻合度较高。Liu 和 Luo^[16]在应用双作物系数法的过程中发现，双作物系数法可以反映冬小麦蒸散量的变化趋势，在估计蒸散总量时较准确，但在估计峰值和短时段累积值时准确性较低。从图 2a 和 2b 可以看出，在蒸散量 $> 6 \text{ mm/d}$ 或 $< 1 \text{ mm/d}$ 的区间上，模拟值与实测值偏差较大，说明 SIMDualKc 模型对冬小麦蒸散量的一些极值和短期内波动性的模拟精度较差，适合趋势的反映和较长时段的模拟。校正后的参数见表 2。

表 2 SIMDualKc 模型主要参数的初始值和校正值
Table 2 Initial and corrected values of main parameters of SIMDualKc model

参数 Parameter	初始值 Initial value	校正值 Corrected value
初期基础作物系数 Basal crop coefficient in initial stage K_{cbini}	0.15	0.15
中期作物系数 Basal crop coefficient in mid season stage K_{cbmid}	1.1	1.15
后期作物系数 Basal crop coefficient in late season stage K_{cbend}	0.3	0.6
初期土壤水分消耗比率 Soil water consumption ratio in initial stage p_{ini}	0.55	0.65
中期土壤水分消耗比率 Soil water consumption ratio in mid season stage p_{mid}	0.55	0.55
后期土壤水分消耗比率 Soil water consumption ratio in late season stage p_{end}	0.55	0.65
蒸发层深度 Depth of evaporation layer Z_e/mm	0.1	0.1
总蒸发水量 Total evaporable water TEW/mm	28	48
易蒸发水量 Readily evaporable water REW/mm	10	7

为了验证参数校正结果的准确性，用校正后的参数模拟 2 a 非充分灌溉的 16 个处理，将冬小麦蒸散量的模拟值与水量平衡法计算值进行对比，限于篇幅，不再给出用于验证的蒸散量模拟值和实测值的变化曲线。2 a 所有处理进行模型参数校验时的误差统计量如表 3 所示。本文选用的 b 、 R^2 、RMSE、AAE 和 d_{IA} 是 Rosa 等^[19]推荐的误差统计量，新增 NSE 和 RSR 均为标准化的误差统计量。 b 表示的是模拟值与实测值的线性吻合程度。Willmott^[30]认为， b 在应用过程中假设实测值是准确的，模拟值与实测值的差异均来自于模拟值的误差。而在实际中，测量误差难以避免，这就对 b 评价模型误差的准确度造成了一定的影响。 R^2 表示模拟值和实测值的共线性（collinearity）程度^[30]，但 Legates 等^[31]认为， R^2 对模拟值和实测值之间的数值差异不敏感。如果模拟值和实测值之间存在一定的关系，此时虽然有较高的 R^2 值，但如果模拟值和实测值的拟合线距离 1:1 线较远，则仅依靠 R^2 还不能说明模拟精度一定高，需要另外可以表示模拟值和实测值之间数值差异的误差统计量。NSE 表示的是剩余方差（residual variance）和实测值方差（measured data variance）的相对关系^[32]，反映了模拟值与实测值的拟合线相比于 1:1 线的吻合程度^[29]，可以直接反映模拟值与实测值之间的数值差异。从表 3 可以看出，各处理的 NSE 值均小于 R^2 值，这表明仅靠 R^2 判断模拟值与实测值的差异，有可能夸大模型的准确度，引进 NSE 是必要的。RMSE 和 AAE 均是表示模拟值和实测值误差的统计量，它们的单位与原数据的单位相同，在表示模拟值与实测值差异的同时，也有利于对数据的进一步分析^[29]。但 RMSE 和 AAE 同样有其局限性，虽然人们通常认为越小的 RMSE 和 AAE 值代表越高的模拟精度^[29]，但在不同的研究背景下，数据的测量技术、测量精度、可接受的误差范围不尽相同，这就需要将误差统计量标准化，给出统一的标准化误差统计量范围。Legates 等^[31]为此提出了均方根误差/观测值标准差比率（RSR）的概念，它是均方根误差对观测值标准差的标准化形式，消除了因数据类型不同对误差判断的影响，RMSE 和 AAE 与 RSR 相结

合, 可以从绝对尺度和相对尺度综合评价误差的大小。 d_{IA} 表示的是模拟值和实测值在均值和方差上的差异, 但由于计算过程中平方项的存在, 对极值 (extreme value) 的响应较敏感^[32], 因此也需要与其它误差统计量配合使用。综上, 为了综合评价模拟值和实测值的共线性、数值差异、绝对尺度误差、相对尺度误差, R^2 、NSE、RMSE 和 RSR 应着重计算。从表 3 可以看出参数的验证情况良好, 用于验证的各处理 b 为 0.867~1.224; R^2 为 0.770~0.948; RMSE 为

0.398~0.810 mm/d; AAE 为 0.321~0.572 mm/d; NSE 为 0.603~0.935; RSR 为 0.245~0.607; d_{IA} 为 0.919~0.982。以上结果说明经参数校验后的 SIMDualKc 模型可以较好地模拟非充分灌溉条件下冬小麦蒸散量的变化过程, 模拟结果可以用于研究冬小麦蒸散量的变化规律。由于经参数校验后的 SIMDualKc 模型对冬小麦蒸散量的模拟精度较高, 因此下文用模型模拟的结果分析冬小麦全生育期蒸散和土壤蒸发的变化规律。

表 3 冬小麦蒸散量模拟值与实测值误差统计量
Table 3 Error statistics between simulated and observed evapotranspiration of winter wheat

年份 Year	处理 Treatment	回归系数 Regression coefficient b	决定系数 Determination coefficient R^2	均方根误差 RMSE/(mm·d ⁻¹)	平均绝对误差 AAE/(mm·d ⁻¹)	纳什系数 NSE	均方根误差/观测 值标准差比率 RSR	一致性 指数 d_{IA}
2013—2014 年	T1	0.899	0.819	0.688	0.546	0.813	0.431	0.949
	T2	1.106	0.948	0.489	0.358	0.907	0.295	0.977
	T3	0.945	0.932	0.398	0.321	0.935	0.245	0.982
	T4	1.017	0.871	0.577	0.426	0.868	0.351	0.966
	T5	0.940	0.902	0.548	0.471	0.903	0.301	0.972
	T6	1.005	0.850	0.674	0.470	0.843	0.381	0.957
	T7	1.208	0.797	0.810	0.572	0.603	0.607	0.919
	T8	1.108	0.831	0.621	0.478	0.769	0.462	0.946
	T9	0.895	0.873	0.663	0.451	0.888	0.342	0.961
2014—2015 年	F1	0.867	0.868	0.654	0.505	0.856	0.378	0.955
	F2	1.062	0.806	0.564	0.465	0.772	0.460	0.943
	F3	1.032	0.820	0.482	0.423	0.789	0.439	0.941
	F4	1.224	0.945	0.515	0.386	0.800	0.431	0.960
	F5	1.062	0.770	0.525	0.459	0.724	0.506	0.929
	F6	0.945	0.862	0.494	0.413	0.857	0.366	0.956
	F7	1.084	0.875	0.467	0.370	0.838	0.390	0.961
	F8	1.063	0.790	0.570	0.454	0.750	0.483	0.938
	F9	1.079	0.824	0.513	0.409	0.776	0.455	0.944

Note: RMSE, AAE, NSE, RSR and d_{IA} are root mean square error, average absolute error, Nash Sutcliffe efficiency, RMSE-observations standard deviation ratio and index of agreement, same as below.

本研究校正后的 K_{cbend} 值 (0.6) 与樊引琴等^[11]得到的同一地区冬小麦 K_{cbend} 值 (0.2) 相比差异较大, 但与宿梅双等^[13]研究所得的 K_{cbend} 值 (0.79) 较接近。张强等^[29]认为, 作物系数与干旱胁迫系数呈负指数函数关系, 较低的土壤含水率会导致较低的作物系数值。樊引琴等的试验中, 生长后期无灌水, 降雨量仅约为 35 mm, 而宿梅双等的试验中生长后期的降雨量和灌水量总和约为 85 mm, 与本研究生长中期和生长后期所作处理的水分状况较接近 (2013—2014 生长中期平均灌水 84 mm, 2014—2015 年生长后期平均灌水 106 mm), 因此本研究较高的 K_{cbend} 值可能是灌水后较高的土壤含水率造成的。

2.2 冬小麦全生育期蒸散量的变化

2a 不同水分处理的冬小麦蒸散量的模拟结果如表 4 所示。各处理蒸散量的阶段值和全生育期变化趋势基本相同, 以 2013—2014 年的 T1 处理为例, 从图 2a 可以看出, 从播种开始, 冬小麦的日蒸散量逐渐增大, 在播种后第 176 天 (快速生长期) 达到第 1 个高峰, 日蒸散量为 4.67 mm/d; 从快速生长期开始, 冬小麦的拔节、抽穗过程对水分的需求量大, 大量的土壤水分在冬小麦的蒸腾作用下, 经过土壤—植物—大气连续系统被植株利用, 日蒸散量在播种后

第 204 天 (生长中期) 达到最高峰, 为 6.82 mm/d; 从生长后期开始直至成熟, 冬小麦的叶萎蔫变黄, 植株蒸腾强度显著降低, 因此日蒸散量在此阶段逐渐减小。除去每次灌水后的短暂增加, 冬小麦的日蒸散量在全生育期表现出先增大后减小的趋势。从各生育期来看, 冬小麦生长初期、快速生长期、生长中期和生长后期的日平均蒸散量分别为 0.58、2.00、3.62 和 3.88 mm/d, 生长中期和生长后期对应冬小麦拔节-抽穗-灌浆-成熟的生育期, 是冬小麦营养生长和生殖生长最旺盛的时期, 所以蒸散的强度最大。从不同的水分处理来看, 2013—2014 年不同处理的冬小麦生长中期和生长后期蒸散量占全生育期蒸散总量的 49.8%~55%, 2014—2015 年不同处理的冬小麦生长中期和生长后期蒸散量占全生育期蒸散总量的 49.9%~54.4%。该阶段同时也是冬小麦产量形成的关键时期, He 等^[34]认为, 在三叶期和分蘖期过早的灌水无助于冬小麦的增产, 灌 3 水时, 第 2 水的最佳时间为抽穗中期, 灌 4 水时, 第 1 水推迟到拔节初期有助于增产。房稳静等^[35]认为, 灌浆期干旱会减缓冬小麦灌浆速率, 缩短灌浆时间, 不利于增产。综上, 拔节-灌浆期是冬小麦的需水关键期, 在使其他生育期不出现重度亏缺的前提下, 应保证该阶段的水分需求。

表 4 不同处理冬小麦不同生育期蒸散量和土壤蒸发比例

Table 4 Evapotranspiration and evaporation ratio in different growth stages of winter wheat under different treatments

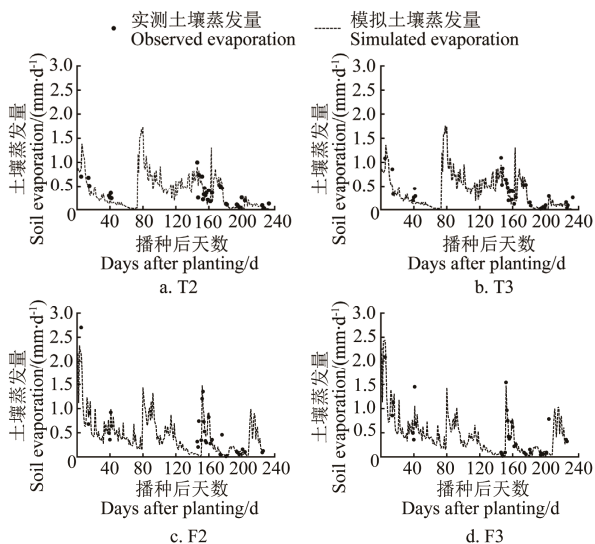
年份 Year	处理 Treatment	生长初期 Initial stage		快速生长期 Crop development stage		生长中期 Mid season stage		生长后期 Late season stage		全生育期 Whole growth stage	
		ET _C /mm	E/ET _C %	ET _C /mm	E/ET _C %	ET _C /mm	E/ET _C %	ET _C /mm	E/ET _C %	ET _C /mm	E/ET _C %
2013—2014 年	T1	75.05	79.71	99.84	26.58	101.39	2.03	108.56	2.48	384.84	23.67
	T2	75.84	79.52	98.92	25.59	104.22	1.93	93.07	1.94	372.05	24.04
	T3	76.36	80.02	99.61	26.33	94.05	2.07	80.70	2.33	350.71	25.99
	T4	76.73	80.12	99.62	26.48	101.40	2.00	86.53	2.22	364.28	25.20
	T5	72.89	79.16	97.63	28.98	99.68	2.30	108.67	1.66	378.88	23.78
	T6	76.27	79.99	99.09	26.06	95.96	1.99	92.65	2.61	363.98	25.05
	T7	72.89	79.16	99.82	26.67	102.59	2.08	96.87	3.04	372.16	24.02
	T8	74.75	79.03	99.83	26.61	100.58	2.08	85.53	2.38	360.69	24.89
	T9	75.12	79.13	99.57	26.39	94.37	2.05	105.35	2.18	374.42	24.02
2014—2015 年	F1	108.79	83.05	81.99	16.30	128.08	2.31	83.39	11.91	402.24	28.24
	F2	96.27	80.75	79.67	15.96	115.44	2.52	75.94	11.66	367.31	27.83
	F3	93.16	81.05	74.44	14.89	96.22	2.91	75.05	14.41	338.88	29.57
	F4	100.14	81.69	79.43	16.12	122.79	2.41	75.08	9.20	377.43	27.68
	F5	100.14	81.69	79.12	15.80	105.59	2.53	72.96	11.12	357.81	29.37
	F6	101.19	82.09	75.40	15.78	114.19	2.69	79.27	12.79	370.04	29.23
	F7	93.16	81.05	78.54	16.00	114.26	2.58	74.72	12.31	360.68	27.79
	F8	89.34	79.97	78.54	15.72	120.68	2.58	79.26	11.20	367.82	26.04
	F9	94.04	81.46	74.05	15.35	106.47	2.75	76.77	13.83	351.32	28.89

注：ET_C 和 *E* 分别表示冬小麦的蒸散量和土壤蒸发量。

Note: ET_C and *E* represent evapotranspiration and evaporation of winter wheat.

2.3 土壤蒸发的模拟

用 SIMDualKc 模型模拟 2 a 各处理的土壤蒸发量，对比模拟值和微型蒸渗仪实测值，为了不对蒸渗仪的测量造成扰动，T1 和 F1 处理未埋设微型蒸渗仪，T4 处理因微型蒸渗仪漏土，仅保留生长初期的一部分数据。2013—2014 年 T2 和 T3 处理及 2014—2015 年 F2 和 F3 处理的土壤蒸发量模拟值和实测值的对比如图 3 所示，其余处理的结果如表 4 所示，误差统计结果如表 5 所示。



注：T2、T3、F2、F3 灌水量分别为 228、192、264、198 mm。

Note: Irrigation amount of T2, T3, F2 and F3 are 228, 192, 264 and 198 mm, respectively.

图 3 2013—2015 年各处理土壤蒸发量模拟值和实测值对比

Fig.3 Comparison between simulated and observed evaporation in winter wheat field under different treatments in 2013-2015

图 3 可以看出，土壤蒸发量的模拟值和实测值吻合度较高。大部分实测值高于模拟值，赵娜娜等^[21]认为可

能是蒸发筒壁的增温效应所致，但 Evett 等^[6]的研究表明，本研究所用的 PVC 材料的蒸发筒对筒内土壤的增温效应并不明显。Klocke 等^[36]认为，蒸发筒内由于不种植作物而缺少根系吸水，致使筒内土壤含水率高于外部，从而造成测量值偏高，本研究中实测值偏高可能是这一原因导致的，另外蒸发筒埋设在植株行间，地表裸露较多也可能导致测量值偏大。从图 3 还可以看出，微型蒸渗仪的实测值较模拟值波动较大，可能是因为测量扰动和刮风使得筒内土体减少而造成的误差。各处理土壤蒸发量的模拟值和实测值的 *b* 为 0.704~0.980，*R*² 为 0.719~0.957，RMSE 为 0.109~0.361 mm/d，AAE 为 0.085~0.172 mm/d，NSE 为 0.645~0.904，RSR 为 0.305~0.586，*d*_{IA} 为 0.889~0.995。各误差统计量取值均在合理的范围内，说明经参数校验的 SIMDualKc 模型可以模拟冬小麦农田的土壤蒸发，模拟结果可用于预测土壤蒸发的变化趋势。

表 5 2013—2015 年土壤蒸发量模拟值与实测值误差统计量

Table 5 Error statistics between simulated and observed evaporation in 2013-2015

年度 Year	处理 Treatment	<i>b</i>	<i>R</i> ²	RMSE/ (mm·d ⁻¹)	AAE/ (mm·d ⁻¹)	NSE	RSR	<i>d</i> _{IA}
2013—2014 年	T2	0.916	0.776	0.109	0.085	0.701	0.540	0.931
	T3	0.704	0.957	0.207	0.122	0.698	0.544	0.889
	T4	0.733	0.864	0.236	0.127	0.872	0.451	0.995
	T5	0.724	0.759	0.248	0.118	0.720	0.552	0.900
	T6	0.717	0.763	0.238	0.138	0.718	0.525	0.897
	T7	0.818	0.781	0.176	0.105	0.764	0.486	0.930
	T8	0.782	0.782	0.191	0.147	0.755	0.505	0.925
	T9	0.788	0.762	0.192	0.161	0.716	0.557	0.919
2014—2015 年	F2	0.918	0.835	0.204	0.124	0.835	0.400	0.954
	F3	0.980	0.896	0.168	0.099	0.880	0.341	0.972
	F4	0.851	0.929	0.180	0.113	0.904	0.305	0.972
	F5	0.717	0.785	0.361	0.124	0.737	0.505	0.910
	F6	0.739	0.805	0.319	0.157	0.739	0.503	0.920
	F7	0.720	0.747	0.360	0.171	0.675	0.561	0.900
	F8	0.755	0.719	0.314	0.172	0.645	0.586	0.901
	F9	0.816	0.742	0.292	0.162	0.658	0.575	0.916

2.4 不同灌水条件下的土壤蒸发比例

以 T1 处理为例分析冬小麦全生育期土壤蒸发比例, 生长初期冬小麦幼苗矮小, 地面覆盖度小于 10%, 大部分农田处于裸露状态, 土壤蒸发量在蒸散量中占绝大部分, 土壤蒸发比例可达 79.71%; 越冬期后, 冬小麦开始返青, 地面覆盖度增大, 土壤蒸发比例减小, 快速生长期的土壤蒸发比例仅为 26.58%; 从生长中期开始, 冬小麦开始拔节, 植株蒸腾强度变大, 逐渐成为蒸散过程的主导, 经历抽穗—灌浆—成熟的过程, 植株蒸腾的增强和蒸发层土壤水分的消耗使得土壤蒸发比例持续减小, 生长中期和生长后期的土壤蒸发比例分别只有 2.03% 和 2.48%。由表 4 的结果可知, 冬小麦全生育期土壤蒸发比例呈现出生长中期 < 生长后期 < 快速生长后期 < 生长初期的规律, 这与赵娜娜等^[21]的研究结果一致, 土壤蒸发比例在冬小麦全生育期的变化规律与地面覆盖度的变化规律一致, 说明地面覆盖度可能是土壤蒸发比例的影响因子之一。土壤蒸发比例在每次灌水后均会有大幅度的增加, 3 次灌水后土壤蒸发比例分别由 43% 增加到 87%、由 5.9% 增加到 32%、由 0.7% 增加到 42%, 增加幅度依次为 44%、26.1%、41.3%。这说明灌水后短时间内土壤蒸发比例变化很大, 且在生长初期和中期的增幅较大。导致这一现象的原因有: 生长初期的地面覆盖度较小, 大面积的裸露农田被充分湿润后, 土壤蒸发会大幅增加; 生长中期的地面覆盖度虽然在 90% 左右, 但是由于此时的气温和太阳辐射均较高, 因此土壤蒸发也会因为灌水而大幅增加。与生长初期和中期相比, 快速生长期的地面覆盖度、气温和太阳辐射均处于中等水平, 灌水后的土壤蒸发受它们的影响不剧烈。

2 a 各处理的土壤蒸发比例为 23.67%~29.57%。Kang 等^[37]研究表明, 本地区冬小麦全生育期的土壤蒸发比例为 33%, 高于本研究所得的值。Chen 等^[38]认为, 较大的植株密度会降低土壤蒸发比例, 本研究播种量为 357 万株/hm², 大于 Kang 等研究中的 200 万株/hm², 可能是植株密度的不同导致了两者土壤蒸发的差异。2013—2014 年各处理快速生长期土壤蒸发比例的平均值比 2014—2015 年的对应值大 10.86%。2 a 快速生长期同一水平的灌水量差异不大, 土壤蒸发比例的不同可能是前一个生育期灌水量的不同导致的。2014—2015 年生长初期灌水量仅为 2013—

2014 年的 54%, 进入越冬期后, 冬小麦生长缓慢, 耗水强度明显减弱, 2013—2014 年和 2014—2015 年冬灌后至快速生长期的平均蒸散强度分别为 0.85 和 0.72 mm/d, 除了维持冬小麦正常的蒸散, 剩余的冬灌水在低温条件下凝结在土壤孔隙中, 2014—2015 年由于冬灌水量较少, 导致快速生长期开始时可利用的土壤贮水量也较少, 造成了较低的土壤蒸发比例。分析每 1 年度内各处理的土壤蒸发, 可以看到, 各生育期的灌水水平对该阶段土壤蒸发的影响并不大, 从全生育期来看, 虽然各处理全生育期灌水总量相差较大, 但全生育期土壤蒸发比例却相差很小, 2013—2014 年和 2014—2015 年各处理全生育期土壤蒸发比例最大分别相差 2.32% 和 3.53%。结合前文得出的结论, 灌水对土壤蒸发比例的影响仅限于灌水后一段时间内, 从长期看, 充分灌溉和非充分灌溉对土壤蒸发的影响并不大。王健等^[39]在本地区进行夏玉米田土壤蒸发的研究时, 也发现了类似的规律, 在减少灌水量的情况下, 低灌水年的玉米蒸散量 (356.26 mm) 显著低于高灌水年的蒸散量 (415.51 mm), 但土壤蒸发比例没有显著差异, 2 a 分别为 0.97% 和 1.21%。造成这一现象可能的原因是, 高水处理的作物生长状况优于低水处理的作物, 较大的植株蒸腾量抵消了一部分因灌水而增加的土壤蒸发比例, 从而使得各处理土壤蒸发比例差异不显著。

2.5 土壤蒸发比例及影响因素

双作物系数法计算土壤蒸发量时, 用的是土壤蒸发系数 (K_e) 和参考作物蒸散量 (ET_0) 的乘积^[9]。影响参考作物蒸散量的主要是气象因子, 范文波等^[40]认为, 气象因子之间存在很强的交互作用, 只研究单个因子对蒸散的影响不够全面。为了探究影响土壤蒸发比例的各因子间的交互作用情况, 选取气象因子 (最低气温、最高气温、平均相对湿度、2 m 处风速、太阳辐射量) 和作物因子 (地面覆盖度), 采用通径分析^[41-45]的方法分析各因子对土壤蒸发的直接作用和间接作用, 得到了各因子对土壤蒸发比例的间接作用系数 (indirect influential coefficient, IIC)、总间接作用系数 (total indirect influential coefficient, TIIC)、直接作用系数 (direct influential coefficient, DIC) 和总作用系数 (total influential coefficient, TIC), 通径分析结果见表 6。

表 6 土壤蒸发比例影响因子通径分析结果
Table 6 Path analysis result of evaporation influential factors

因子 Factor	间接作用系数 Indirect influential coefficient IIC						总间接作用 系数 Total TIIC	直接作用系数 Direct influential coefficient DIC	总作用系数 Total TIC
	通过 X_1 Through X_1	通过 X_2 Through X_2	通过 X_3 Through X_3	通过 X_4 Through X_4	通过 X_5 Through X_5	通过 X_6 Through X_6			
X_1		-0.198	-0.028	0.024	-0.071	-0.563	-0.836	0.162	-0.674
X_2	0.130		0.021	0.046	-0.121	-0.525	-0.448	-0.247	-0.695
X_3	0.030	0.035		-0.009	0.019	-0.115	-0.040	-0.150	-0.190
X_4	0.038	-0.110	0.012		-0.123	-0.290	-0.473	0.103	-0.370
X_5	0.068	-0.175	0.017	0.074		-0.475	-0.492	-0.170	-0.662
X_6	0.129	-0.183	-0.024	0.042	-0.114		-0.150	-0.707	-0.857

注: X_1 ~ X_6 分别为最低气温、最高气温、平均相对湿度、2 m 处风速、太阳辐射量和地面覆盖度。

Note: X_1 - X_6 is minimum temperature, highest temperature, average relative humidity, wind speed at 2 m, solar radiation and surface coverage, respectively.

从通径分析的结果可知, 各气象因子和作物因子均在不同程度地影响土壤蒸发比例, 但就直接作用来说,

最高气温、太阳辐射量和地面覆盖度对土壤蒸发的直接作用明显高于其他因子, 三者的直接作用系数分别为

-0.247、-0.170 和 -0.707。太阳辐射是蒸发的能量来源,蒸发的持续进行有赖于蒸发面持续接收太阳辐射,但太阳辐射同时也为蒸腾作用提供能量,并且随着作物的生长,蒸腾速率会远大于蒸发速率,如 T1 处理,生长初期的蒸发速率和蒸腾速率分别为 0.46 和 0.12 mm/d,而到了生长中期,蒸发速率和蒸腾速率则分别为 0.08 和 3.54 mm/d,此时蒸发速率远远小于蒸腾速率,因此,太阳辐射量对蒸腾的正效应强于对土壤蒸发的正效应,过高的太阳辐射量会降低土壤蒸发比例。太阳辐射量的累积会导致气温的升高,最高气温对土壤蒸发比例的负效应的原理与太阳辐射量相同。当地面覆盖度较大时,大量辐射能被作物冠层截获,可用于蒸发的能量就变得很少,且作物冠层茂密,蒸腾速率很大,因此地面覆盖度对土壤蒸发比例有较强的负效应。除以上 3 个因子以外,饱和水汽压差影响蒸发的速度,饱和水汽压差越大,蒸发的能量梯度越大,蒸发速度越快,较大的平均相对湿度会导致较小的饱和水汽压差,因此平均相对湿度对土壤蒸发比例有较强的负效应,它的直接作用系数为 -0.150。

就总的作用来说,对土壤蒸发比例影响最大的因子是地面覆盖度,它对土壤蒸发比例的总作用系数为 -0.857。地面覆盖度同时也影响其他因子对土壤蒸发比例的作用,最高气温和太阳辐射量通过地面覆盖度对土壤蒸发的间接作用系数分别为 -0.525 和 -0.475,加强了它们本身对土壤蒸发比例的负效应。有风时,湍流加强,土壤蒸发面上的水汽随湍流的扩散速度会加快,因此 2 m 处风速对土壤蒸发比例有正效应(直接作用系数为 0.103)。但当冠层较密时,风速对蒸发面的影响也十分有限,2 m 处风速通过地面覆盖度的间接作用系数高达 -0.290,综合来看,2 m 处风速对土壤蒸发的总作用系数为 -0.370。

综合通径分析结果,本地区影响土壤蒸发比例的主要因子有太阳辐射量、平均相对湿度和地面覆盖度,其中对土壤蒸发比例影响最大的因子是地面覆盖度,它除了自身影响以外,还能通过影响其他因子来影响土壤蒸发比例。用 T2 的数据建立 f_c 与 E/ET_c 关系式

$$E/ET_c = e^{0.201 - 4.744f_c}, R^2 = 0.867 (P < 0.01)。$$

用 2a 不同处理的数据验证回归方程的有效性,以 T2 和 F2 为例,拟合曲线如图 4 所示,其余处理拟合曲线的决定系数 (R^2) 见表 7。

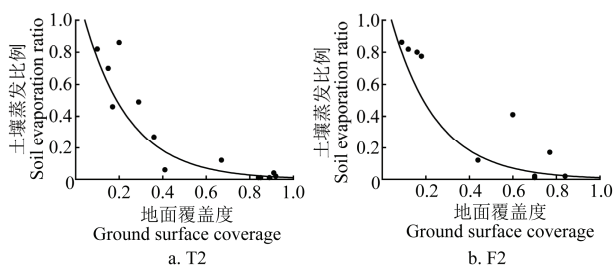


图 4 2013—2015 年冬小麦农田土壤蒸发比例与地面覆盖度的关系

Fig.4 Relationship between evaporation ratio and ground surface coverage in winter wheat field in 2013-2015

表 7 土壤蒸发比例回归方程决定系数

Table 7 Determination coefficients of evaporation regression model

年份 Year	处理 Treatment	决定系数 R^2
2014—2015 年	T2	0.867**
	T3	0.902**
	T4	0.821**
	T5	0.808**
	T6	0.807**
	T7	0.797**
	T8	0.855**
	T9	0.895**
2013—2014 年	F2	0.851**
	F3	0.808**
	F4	0.865**
	F5	0.842**
	F6	0.721**
	F7	0.827**
	F8	0.842**
	F9	0.752**

注: **表示相关性在 0.01 水平上显著。

Note: ** indicates significance of correlation at 0.01 level.

用回归方程 $E/ET_c = e^{0.201 - 4.744f_c}$ 预测各处理的土壤蒸发比例,决定系数为 0.721~0.902 ($P < 0.01$),说明回归方程对土壤蒸发比例的预测效果较好。该回归模型在计算土壤蒸发量 (E) 时只有蒸散量 (ET_c) 和地面覆盖度 (f_c) 2 个输入变量,蒸散量可以用蒸渗仪或水量平衡等方法得到,地面覆盖的测定方法也较简便,可以方便地计算土壤蒸发量,作为田间实测和计算机模拟以外插补数据的简易方法。

3 讨论

模型在应用前要通过校正来确定合适的参数^[24],并在验证过程中证明通过输入校正后的参数可以满足一定的模拟精度^[46]。评价模拟精度时,应充分考虑模拟值和实测值之间的共线性、数值差异、绝对尺度的误差、相对尺度的误差等方面,这就需要从数理统计的角度弄清误差统计量的意义,合理选择误差统计量,保证模型评价的全面性。本文用 b 和 R^2 评价模拟值和实测值的共线性程度,用 NSE 评价模拟值和实测值的数值差异,用 RMSE、AAE 和 RSR 分别评价模拟值和实测值在绝对尺度和相对尺度上的误差,用 d_{IA} 评价模拟值和实测值在均值和方差上的差异,满足了从不同角度评价模拟精度的要求,从一定程度上弥补了评价模型模拟精度时在数学原理上探讨的不足,提出的这一套误差统计量不仅适用于 SIMDualKc 模型,在其他模型上也具有一定的应用价值。

SIMDualKc 模型在反映冬小麦蒸散量和土壤蒸发量的变化趋势及长时段累积值时表现得较为准确,但在反映峰值和短时段累积值时不太准确,之前的研究者^[16]在应用双作物系数法时同样面临这样的问题。因此,为了研究的全面性,模拟计算与田间实测应该互为补充。此外, SIMDualKc 模型作为一个集成双作物系数法原理的模型,在与作物生长状况结合的方面还有一定缺陷,比

如其模拟作物根系生长时用的是一个近似线性增长的模型,这会对根系吸水的模拟造成一定的偏差,进而影响到蒸散的模拟。模型对作物生育期的划分参照 FAO56 文件^[9]推荐的 4 阶段划分法,与考虑作物器官分化的生育期划分方法^[47]有所不同,模型划分的生育期有时包含作物的多个生长阶段,这就对更为细致的研究造成了影响。比如房稳静等^[35]认为,冬小麦灌浆前期亏水有利于加粒重,而灌浆后期亏水对小麦灌浆有抑制作用,而本研究中冬小麦的灌浆期被包含在生长中期当中,不利于研究的细化。另外, SIMDualKc 模型也需要与一些以产量为输出变量的作物生长模型结合,对作物水分生产函数、水分利用效率做进一步的研究。

4 结 论

本研究利用 2013—2014 年和 2014—2015 年的冬小麦不同灌溉制度小区控水试验数据对 SIMDualKc 模型进行了参数校正和验证,并用模型模拟数据对冬小麦蒸散和土壤蒸发规律进行了研究,可以得出以下结论:

1) 回归系数 (b)、决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (AAE)、一致性指数 (d_{IA})、纳什系数 (NSE) 和均方根误差/观测值标准差比率 (RSR) 在评价 SIMDualKc 模型的模拟精度时,能互相补充单个统计量在数学原理上的不足,其中 R^2 、NSE、RMSE 和 RSR 应优先计算。SIMDualKc 模型可以比较准确地模拟西北旱区冬小麦的蒸散量变化过程,但对较大 ($> 6 \text{ mm/d}$) 或较小 ($< 1 \text{ mm/d}$) 的蒸散量模拟精度较差,适用于长时段的模拟,特别是在微型蒸渗仪测量精度受人为扰动及环境因素影响较大的情况下,在单独研究土壤蒸发变化过程方面具有一定优势。

2) 冬小麦生长初期的蒸散量以土壤蒸发为主,土壤蒸发比例在 80% 左右,随着冬小麦的生长,土壤蒸发逐渐减小,生长中期和生长后期的土壤蒸发比例仅为 2%~3%。冬小麦全生育期土壤蒸发比例呈现出生长中期<生长后期<快速生长后期<生长初期的规律,拔节—灌浆期是冬小麦需水关键期,在设计非充分灌溉制度时应优先保证该阶段的供水。

3) 灌水仅在短时间内影响土壤蒸发,从长期来看,影响土壤蒸发的主要因子有太阳辐射量、平均相对湿度和地面覆盖度,其中地面覆盖度是影响土壤蒸发的最主要因子,它除了自身影响土壤蒸发以外,还能通过影响其他因子来影响土壤蒸发。

4) 建立了土壤蒸发比例与地面覆盖度的回归模型,决定系数为 0.721~0.902,该模型输入变量少,可以根据地面覆盖度很好的预测土壤蒸发比例,在得到蒸散量的基础上可以简便地计算土壤蒸发量,可以作为田间实测和计算机模拟之外的另一种插补数据的方法。

【参 考 文 献】

- [1] 康绍忠, 杜太生, 孙景生, 等. 基于生命需水信息的作物高效节水调控理论与技术[J]. 水利学报, 2007, 38(6): 661—667.
Kang Shaozhong, Du Taisheng, Sun Jingsheng, et al. Theory and technology of improving irrigation water use efficiency based on crop growing water demand information[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(6): 661—667. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 小麦/玉米套作田棵间土壤蒸发的数学模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 72—81.
Wang Zikui, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Mathematical simulation of soil evaporation from wheat/maize intercropping field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 72—81. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘钰. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. 水利学报, 1999(6): 47—52.
Liu Yu. Measurement of evaporation from wheat field and bare soil by using micro-lysimeters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(6): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸散比例研究[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 Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(4): 17—22. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李王成, 王为, 冯绍元, 等. 不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 6—13.
Li Wangcheng, Wang Wei, Feng Shaoyuan, et al. Field experimental study on the measurement of soil evaporation using different types of micro-lysimeters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(10): 6—13. (in Chinese with English abstract)
- [6] Evett S R, Warrick A W, Mthias A D. Wall material and cropping effects on micro-lysimeter temperatures and evaporation[J]. Soil Science Society of American Journal, 1995, 59: 329—336.
- [7] 高晓飞, 王晓岚. 微型蒸发器口径影响土壤蒸发测量值的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 1—4.
Gao Xiaofei, Wang Xiaolan. Effects of micro-lysimeter diameters on soil evaporation measurement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [8] 高晓飞, 史海珍, 杨洁, 等. 微型蒸发器长度影响土壤蒸发测量值的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 20(4): 11—15.
Gao Xiaofei, Shi Haizhen, Yang Jie, et al. Effects of stainless steel micro-lysimeter lengths on soil evaporation measurement[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 20(4): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [9] Allen R G, Pereira L S, Dirck R, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1998.
- [10] Allen R, Pereira L, 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.
- [11] 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.
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(3): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈凤, 蔡焕杰, 王健, 等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸散和作物系数的确定[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 Agricultural Engineering (Transactions of

- the CSAE), 2006, 22(5): 191—193. (in Chinese with English abstract)
- [13] 宿梅双, 李久生, 饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 25—29.
Su Meishuang, Li Jiusheng, Rao Minjie, et al. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweet corn using a weighing lysimeter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(8): 25—29. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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.
Zhao Liwen, Ji Xibin. Quantification of transpiration and evaporation over agricultural field using the FAO-56 dual crop coefficient approach: A case study of the maize field in an oasis in the middle stream of the Heihe River Basin in Northwest China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19): 4016—4026. (in Chinese with English abstract)
- [15] Alberto M C R, Quilty J R, Buresh R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1—12.
- [16] Liu Yujie, Luo Yi. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 31—40.
- [17] Zhao Peng, Li Sien, Li Fusheng, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttleworth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 160: 41—56.
- [18] Rosa R D, Paredes P, Rodrigues G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background and computational strategy[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 8—24.
- [19] Rosa R D, Paredes P, Rodrigues G C, et al. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 2. Model testing[J]. Agricultural Water Management, 2012, 103: 62—77.
- [20] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 89—95. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵娜娜, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 夏玉米田间蒸发的田间试验与模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 66—73.
Zhao Nana, Liu Yu, Cai Jiabing, et al. Research on soil evaporation of summer maize by field measurement and model simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 66—73. (in Chinese with English abstract)
- [22] 邱让建, 杜太生, 陈任强. 应用双作物系数模型估算温室番茄耗水量[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 678—686.
Qiu Rangjian, Du Taisheng, Chen Renqiang. Application of the dual crop coefficient model for estimating tomato evapotranspiration in greenhouse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 678—686. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李石琳. 基于涡度相关法 SIMDual_Kc 模型的夏玉米水分利用效率及其影响因素研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Li Shilin. Study on the Summer Mmaize Water Use Efficiency and Influencing Factors based on Eddy Covariance Method and SIMDual_KcModel[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [24] Ma L, Ascoug J C, Ahuja L R, et al. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation[J]. Transactions of the Asac, 2000, 43(4): 883—895.
- [25] 强小嫚, 蔡焕杰, 王健. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸散量对比[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 12—17.
Qiang Xiaoman, Cai Huanjie, Wang Jian. Comparative study of crop evapotranspiration measured by Bowen ratio and lysimeter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(2): 12—17. (in Chinese with English abstract)
- [26] 牛勇, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 基于大型称重式蒸渗仪的日光温室黄瓜蒸腾规律研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 52—56.
Niu Yong, Liu Honglu, Wu Wenyong, et al. Cucumber transpiration by large-scale weighing lysimeter in solar greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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.
Xu Junzeng, Peng Shizhang, Ding Jiali, et al. Evaluation 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 with English abstract)
- [28] Soldevilla-martinez M, Quemada M, Lopez-urrea R, et al. Soil water balance: Comparing two simulation models of different levels of complexity with lysimeter observations[J]. Agricultural Water Management, 2014, 139: 53—63.
- [29] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50: 885—900.
- [30] Willmott C J. On the validation of models[J]. Physical Geography, 1981, 2: 184—194.
- [31] Legates D R, McCabe G J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation[J]. Water Resources Res, 1999, 35(1): 233—241.
- [32] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles[J]. Hydrology, 1970, 10(3): 282—290.
- [33] 张强, 王文玉, 阳伏林, 等. 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[J]. 科学通报, 2015, 60(15): 1384—1394, 1381.
Zhang Qiang, Wang Wenyu, Yang Fulin, et al. The influence of drought stress on spring wheat evapotranspiration and crop coefficients in semi-arid areas[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60(15): 1384—1394, 1381. (in Chinese with English abstract)
- [34] He Jianqiang, Cai Huanjie, Bai Jiangping. Irrigation scheduling based on CERES-Wheat model for spring wheat production in the Minqin Oasis in Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 128: 19—31.
- [35] 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 98—101.
Fang Wenjing, Zhang Xuefen, Zheng Youfei. Influence of drought on filling velocity of winter wheat during filling period[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(2): 98—101. (in Chinese with English abstract)
- [36] Klocke N L, Martin D L, Todd R W, et al. Evaporation measurements and predictions from soils under crop canopies[J]. Trans ASAE, 1990, 33: 1590—1596.
- [37] 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(3): 239—254.

- [38] Chen Suyin, Zhang Xiyang, Sun Hongyong, et al. Effects of winter wheat row spacing on evapotranspiration, grain yield and water use efficiency[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1126–1132.
- [39] 王健, 蔡焕杰, 陈凤, 等. 夏玉米田蒸散量与棵间蒸发的试验研究[J]. *水利学报*, 2004(11): 108–113.
Wang Jian, Cai Huanjie, Chen Feng, et al. Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(11): 108–113. (in Chinese with English abstract)
- [40] 范文波, 吴普特, 韩志全, 等. 玛纳斯河流域 ET_0 影响因素分析及对 Hargreaves 法的修正[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 19–24.
Fan Wenbo, Wu Pute, Han Zhiquan, et al. Influencing factors analysis of reference crop evapotranspiration and modification of Hargreaves method in Manas river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(8): 19–24. (in Chinese with English abstract)
- [41] 蔡甲冰, 刘钰, 许迪, 等. 基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J]. *水利学报*, 2008, 39(1): 83–90.
Cai Jiabing, Liu Yu, Xu Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(1): 83–90. (in Chinese with English abstract)
- [42] 郑健, 蔡焕杰, 王健, 等. 日光温室西瓜产量影响因素通径分析及水分生产函数[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 30–34.
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Path analysis of yield components and water production function of watermelon in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 30–34. (in Chinese with English abstract)
- [43] 明道绪. 通径分析的原理与方法[J]. *农业科学导报*, 1986a, 1(1): 39–43.
- [44] 明道绪. 通径分析的原理与方法—通径系数与相关系数的关系[J]. *农业科学导报*, 1986b, 1(2): 43–48.
- [45] 明道绪. 通径分析的原理与方法: 性状相关的通径分析[J]. *农业科学导报*, 1986c, 1(3): 43–48.
- [46] Refsgaard J C. Parameterisation, calibration, and validation of distributed hydrological models[J]. *Hydrology*, 198(1): 69–97.
- [47] 曹卫星. 作物栽培学总论[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

Estimation of evapotranspiration and soil evaporation of winter wheat in arid region of Northwest China based on SIMDualKc model

Wang Zishen, Cai Huanjie^{*}, Yu Lianyu, Wang Xiaowen, Shi Xiaohu

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Crop evapotranspiration (ET_C) consists of transpiration and soil evaporation. It is important to know the proportion of transpiration and soil evaporation in field of agricultural water saving. The dual crop coefficient approach can calculate transpiration and soil evaporation by dividing a crop coefficient (K_c) into a basal crop coefficient (K_{cb}) and a soil evaporation coefficient (K_e). In this study, we used SIMDualKc model, a computer model developed by using the theory of dual crop coefficient approach, to calculate evapotranspiration and soil evaporation of winter wheat under different irrigation schedules in arid region Northwest China. Before modeling, a 2-year water-controlled experiment of winter wheat was conducted to calibrate and validate SIMDualKc model. Evapotranspiration was observed by a large-scale weighing lysimeter or calculated by water balance approach, and soil evaporation in 2013–2014 was measured by a micro-lysimeter. We compared the observed evapotranspiration and soil evaporation with the simulated ones. The regression coefficient (b), determination coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), average absolute error (AAE), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), RMSE-observations standard deviation ratio (RSR) and index of agreement were used to evaluate the errors between observed and simulated evapotranspiration and soil evaporation. The results showed that the SIMDualKc model could accurately simulate evapotranspiration and soil evaporation of winter wheat under different irrigation schedules. Modeling result showed that the key water requirement period of winter wheat was from jointing to grain filling stage, and the soil evaporation ratio in the whole winter wheat growth stage was highest in the mid season stage, followed by the late season stage, crop development stage, and initial stage. On the basis of the simulation, we investigated the relationship between soil evaporation ratio and meteorological factors (minimum temperature, maximum temperature, average relative humidity, wind speed at 2 m above ground surface, solar radiation), and crop factor (ground surface coverage) by using the path analysis method. The result showed that the irrigation only affected soil evaporation in a short period, while ground surface coverage affected it most in a long period with a total indirect influential coefficient of -0.857. A regression model of soil evaporation ratio and ground surface coverage was developed by using the soil evaporation ratio simulated by SIMDualKc model and the ground surface observed in the field experiment. The regression model could accurately calculate soil evaporation of winter wheat under different water conditions with determination coefficients 0.721–0.902 and it could be used as a simplified method to calculate soil evaporation. These findings confirmed that SIMDualKc model was a useful tool to study the change of evapotranspiration and soil evaporation under different irrigation schedules. The further study should focus on the integration of SIMDualKc model and other crop growth models.

Keywords: evapotranspiration; soils; models; winter wheat