

# CERES – Wheat 模型中两种蒸发蒸腾量估算方法比较研究

郑 珍<sup>1,2</sup> 蔡焕杰<sup>1,2</sup> 虞连玉<sup>1,2</sup> 王 健<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 基于 CSM – CERES – Wheat 模型中 Priestley – Taylor (PT) 和 FAO56 Penman – Monteith (PM) 2 种蒸发蒸腾量估算方法分别模拟了冬小麦 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季的累积蒸发蒸腾量、日蒸发蒸腾量、土壤含水率、地上干物质以及籽粒产量,并对 2 种方法的模拟结果进行了评价和比较。对 2 种方法模拟的蒸发蒸腾量值与试验区域内大型称量式蒸渗仪的实测结果进行了比较,结果表明,基于 PT 和 PM 方法的 CERES – Wheat 模型均可以准确地模拟干旱—半干旱地区冬小麦的蒸发蒸腾量,累积蒸发蒸腾量和日蒸发蒸腾量的误差分别小于 5.4% 和 3.4%。同时,模型还可以模拟土壤水分动态情况,在 0 ~ 20 cm 土层,CERES – Wheat 模型的模拟值与实测值的标准化均方根误差( $R_{RMSEn}$ )为 39.38%,模拟结果较差,但 20 cm 土层以下,2 种方法的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  均小于 23.1%,且对 40 ~ 60 cm 土层的模拟结果最好。CERES – Wheat 模型基于 PT 和 PM 方法对冬小麦在 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季地上生物量的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 13.57% 和 22.76%,产量的  $R_{RMSEn}$  分别为 11.80% 和 15.42%,模拟结果均较好。另外,CSM – CERES – Wheat 模型基于 PT 方法模拟的蒸发蒸腾量小于基于 PM 方法的模拟值,而 PT 方法对土壤含水率的模拟结果高于 PM 方法的模拟结果,且 PT 方法对地上生物量以及产量的模拟结果高于 PM 方法,用 2 种方法模拟的成熟期地上生物量及产量的  $R_{RMSEn}$  值均在 25% 以内。总之,CSM – CERES – Wheat 模型采用 2 种方法对蒸发蒸腾量、土壤含水率及干物质和产量的模拟结果均较好,表明该模型在我国干旱—半干旱地区的应用性较好,可为该地区不同水分条件下冬小麦的生长情况提供理论支持。

**关键词:** Priestley – Taylor; Penman – Monteith; 蒸发蒸腾量; 土壤含水率; 地上生物量; 产量

**中图分类号:** S512      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0179-13

## Comparison of Two Crop Evapotranspiration Calculating Approaches in CSM – CERES – Wheat Model

Zheng Zhen<sup>1,2</sup> Cai Huanjie<sup>1,2</sup> Yu Lianyu<sup>1,2</sup> Wang Jian<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas,

Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Chinese Arid Area Research Institute of Water-saving Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Crop water requirement is one of the most important factors in farmland water circulatory system, its accurate estimates could help with crop irrigation management. The ability of simulating evapotranspiration ( $ET$ ) for CSM – CERES – Wheat model is very important, which determines the accuracy of model output parameters. The objective was to evaluate the capability of CSM – CERES – Wheat model to simulate the cumulative evapotranspiration, daily evapotranspiration and soil water content of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in 2011—2012 and 2012—2013 growing seasons under semi-arid condition. The daily  $ET$  was measured by using weighing lysimeter that installed in the experimental plot. The ability of CSM – CERES – Wheat model by using two different  $ET$  calculating

收稿日期: 2016-01-21    修回日期: 2016-03-13

**基金项目:** “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD29B01)和国家自然科学基金项目(51179162)

**作者简介:** 郑珍(1988—),女,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhengzhenzzj@163.com

**通信作者:** 蔡焕杰(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业节水与水资源高效利用研究,E-mail: caihj@nwsuaf.edu.cn

approaches, i. e., Priestley – Taylor (PT) and Penman – Monteith (PM), and the simulation results were evaluated and compared. Data were obtained from two experiments with three irrigation levels that were conducted under controlled condition in a rain-out shelter in Yanling, Shaanxi Province of China during the 2011–2012 and 2012–2013 growing seasons. Results showed that the simulated cumulative *ET*, daily *ET* and soil water content of CSM – CERES – Wheat model with both PT and PM approaches had great agreement with measured values, and the simulated cumulative *ET* and daily *ET* were 5.4% and 3.4% less than those of observed values, respectively. The CSM – CERES – Wheat model simulated cumulative *ET* for winter wheat in two growing seasons through PT approach was less than that through PM approach, the relative difference between two approaches was ranged from –3.11% to –0.05%. The model could simulate soil water content correctly as well, in the depth of 0 ~ 20 cm soil layer, the *RMSEn* between simulated results based on two *ET* approaches and observed values was 39.38%, which was relatively high and not good, but below the 20 cm soil depth, the *RMSEn* between simulation results that based on two *ET* approaches and observed values was less than 23.1%, and the simulation results in depth of 40 ~ 60 cm soil layer got the best agreement with the observed values. The model with both PT and PM approaches simulated the above-ground biomass and grain yield accurately as well. The *RMSEn* of final above-ground biomass for two growing seasons were 13.57% for PT approach and 22.76% for PM approach, and *RMSEn* of grain yield were 11.80% for PT approach and 15.42% for PM approach, both of the simulated results had good agreement with observed values. The model using PT approach provided smaller *ET* and higher soil water content than those derived from PM approach as compared with measured data. Additionally, the model using PT approach provided higher final above-ground biomass and grain yield than those derived from PM approach as compared with measured data. However, the model with both two approaches could simulate the total above-ground biomass and grain yield with *RMSEn* within 25% of measured data. Overall, it can be concluded that the CSM – CERES – Wheat model using the two different approaches, i. e., PT and PM, was able to accurately simulate winter wheat *ET* and soil water content. The results also confirmed that the model could be applied in arid and semi-arid areas, and it can be used as a tool for agricultural water management and supplying the decision support for winter wheat growth in Guanzhong Plain.

**Key words:** Priestley – Taylor; Penman – Monteith; evapotranspiration; soil water content; above-ground biomass; yield

## 引言

水分亏缺是影响作物产量的重要因素,在降雨量不足或者降雨分布不均的地区,灌溉成为保证作物生长发育以及促进农业可持续发展的重要管理措施。然而,气候变化、人类活动等对水资源的竞争使农业灌溉用水资源逐渐减少。为了节约用水,提高水分利用效率,亟需解决的问题就是确定合理的灌水时间以及灌水量。作物需水量是农田水分循环系统中最重要的因素之一,也是灌溉管理方案确定时的重要参数,其准确计算是水利工程规划设计及节水农业研究必不可少的组成部分<sup>[1]</sup>,且作物生长过程中不同土层土壤含水率也主要由作物需水量所确定<sup>[2]</sup>。

近年来,作物生长模型已逐渐成为一个非常实用的工具,它可以综合环境、气候以及土壤管理措施

等因素来预测产量,并且可以应用于灌溉制度制定、决策分析以及水肥耦合和气候变化对农业生产影响等方面<sup>[3]</sup>。在众多作物模型中,以美国 CERES 系列作物模型的影响力较大,应用较广泛<sup>[4-5]</sup>。模型是通过计算逐日的土壤水分平衡来估算作物需水量,从而评价作物生长情况。而计算作物需水量的基础是参照作物腾发量 (Reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ ) 的估算。目前已有很多估算参照作物腾发量的经验公式,如 Balaney – Criddle 法<sup>[6]</sup>、Priestley – Taylor 法<sup>[7]</sup>、Hargreaves 法<sup>[8]</sup>、FAO56 Penman – Monteith 法<sup>[9]</sup>等。其中, Priestley – Taylor (PT) 法由于需要的输入参数较少而在作物生长模型中得到广泛应用,如 CSM – CERES – Wheat 模型、COTTAM 模型<sup>[10]</sup>、CROPSIM 模型<sup>[11]</sup>、EPIC 模型<sup>[12]</sup>等。CSM – CERES – Wheat 模型中以 PT 法作为计算蒸发蒸腾量的默认方法,同时还可以采用

FAO56 Penman - Monteith (PM) 法来计算作物蒸发蒸腾量。

作物需水量的准确估算有利于提高灌溉效率、减少灌溉用水费用、优化作物产量以及提高最大净利润。因此,CSM - CERES - Wheat 模型对作物蒸发蒸腾量的准确模拟非常重要,并且应该使用实测的蒸发蒸腾量数据对模拟结果进行验证。目前已经有许多研究应用 CSM - CERES - Wheat 模型对不同水分条件下小麦的生长发育和产量情况进行模拟,均取得较好的结果<sup>[13-16]</sup>。以上研究均基于 PT 方法来模拟作物的蒸发蒸腾量。然而,尽管基于 PT 方法的模拟已取得较好的结果,但是这种方法在干旱地区或是在风速相对较大的地方模拟效果却不理想<sup>[17-19]</sup>。且很少有研究在干旱-半干旱气候条件下用 CSM - CERES - Wheat 模型模拟的蒸散量与大型蒸渗仪的实测数据进行对比。由于模型中提供两种计算蒸发蒸腾量的方法,因此在应用模型做决策或提供技术支持之前,应该先了解作物蒸发蒸腾量以及土壤含水率等指标在分别应用 PT 和 PM 两种方法下的模拟情况。

本研究用冬小麦 2 个生长季(2011—2012、2012—2013 年)的试验数据运行 CSM - CERES - Wheat 模型,用 GLUE 工具对该模型的作物遗传参数进行估计,并分别基于模型中 PT 以及 PM 计算蒸发蒸腾量方法模拟冬小麦生育期的蒸发蒸腾量以及不同深度的土壤含水率,将模拟结果与大型蒸渗仪的实测数据进行对比,并且采用 PT 和 PM 方法对冬小麦成熟期地上生物量以及产量进行模拟,对模拟结果进行评价并对模型基于不同方法的模拟结果进行比较,从而为 CSM - CERES - Wheat 模型在我国干旱-半干旱地区更为广泛的应用提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况及数据

1.1.1 试验区域概况

试验于 2011—2013 年在陕西杨凌西北农林科技大学旱区节水农业研究院(34.3°N、108.4°E)有遮雨棚的试验小区内进行。该试验区地处关中地区,属于温带大陆性季风气候,年平均降水量约为 609 mm,多集中在 6—9 月份。试验区 1 m 土层的平均田间持水量为 23% ~ 25%,凋萎含水率为 8.5%(以上均为质量含水率),0 ~ 2 m 土层的平均干容重为 1.37 g/cm<sup>3</sup>。试验小区上部有移动式电动遮雨棚,在雨雪天将其关闭,其他时间打开,以消除自然降雨对试验的影响。

1.1.2 试验设计

本试验设置 9 个处理,每个处理 3 次重复,共 27 个小区,每个小区面积为 6.67 m<sup>2</sup>,各个处理重复随机排列,其中 2 个小区内安装大型称重式蒸渗仪。不同小区之间为混凝土隔墙,以防止各个小区之间的侧渗。冬小麦试验品种为“小堰 22”,采用人工播种,行距为 20 cm。播种时间分别为 2011 年 10 月 17 日和 2012 年 10 月 18 日,收获日期分别为 2012 年 6 月 6 日和 2013 年 6 月 3 日,播种密度为 270 kg/hm<sup>2</sup>。播种和冬灌时分别施 N 130 kg/hm<sup>2</sup>(折合尿素)。试验设 3 个灌水水平,灌水水平以大型蒸渗仪实测的蒸发蒸腾量 *ET* 为标准,按 100% *ET*、80% *ET* 和 60% *ET* 3 个水平实施灌水。试验时将冬小麦整个生育期划分为越冬、苗期、拔节和开花 4 个重要生长阶段,每个生长阶段的灌水水平不同(表 1)。

表 1 2011—2013 年冬小麦不同水分处理灌水量  
Tab.1 Irrigation levels of different treatments for winter wheat during 2011—2013 growing seasons % *ET*

| 生长季        | 处理 | 越冬期   | 苗期      | 拔节期     | 开花期     |
|------------|----|-------|---------|---------|---------|
| 2011—2012/ | CK | —/100 | 100/100 | 100/100 | 100/100 |
|            | T2 | —/100 | 100/80  | 80/80   | 80/80   |
|            | T3 | —/100 | 100/60  | 60/60   | 60/60   |
|            | T4 | —/80  | 80/100  | 80/80   | 60/60   |
| 2012—2013  | T5 | —/80  | 80/80   | 60/60   | 100/100 |
|            | T6 | —/80  | 80/60   | 100/100 | 80/80   |
|            | T7 | —/60  | 60/100  | 60/60   | 80/80   |
|            | T8 | —/60  | 60/80   | 100/80  | 60/60   |
|            | T9 | —/60  | 60/60   | 80/80   | 100/100 |

注:—表示没有灌水。

1.1.3 观测数据

(1)气象数据观测:气象数据由杨凌一般气象站获得,该气象站距离试验小区 150 m,测得的数据为逐日气象数据。主要包括最高气温、最低气温、降雨量、日照时数、相对湿度以及 2 m 处的最大风速等。

(2)土壤数据测量:试验站内的土壤质地为粉砂粘壤土,土壤剖面数据主要来自于中国土壤数据库(<http://www.soil.csdb.cn/>)、文献[20]以及田间的实测数据。土壤含水率在 2011—2012 年生长季采用时域反射仪(TDR)测定,每 10 cm 一层,共 10 层,并用烘干法校准测得的含水率数据。通常情况下,每隔 7 ~ 10 d 测一次,在灌水前后加测,测得的含水率为体积含水率。在 2012—2013 年生长季,土壤含水率采用烘干法测定,每个小区在 Trime 管附近位置随机选取一个观测点测量 10 ~ 100 cm 土层含水率,每 10 cm 一层,每隔 7 ~ 10 d 测一次。测得的含水率为质量含水率,再将各层质量含水率乘以

各层容重得到体积含水率。

(3)冬小麦蒸发蒸腾量测量:冬小麦蒸发蒸腾量由建于田间的 2 个大型称重式蒸渗仪(西安清远测控技术有限公司)自动测定。测定时间间隔为 1 h/次,累计每天的测量值得到日蒸发蒸腾量值。大型称重式蒸渗仪表面积为 6.67 m<sup>2</sup>,蒸渗仪量程为 0~6 t(±1%),灵敏度小于 150 g,蒸渗仪小区内冬小麦均为充分灌溉水平,其余管理情况与其他各处理情况一致。

1.2 作物生长模型

1.2.1 模型校正

本文采用 GLUE 参数调试程序对冬小麦品种“小堰 22”进行参数率定。参数的调整与确定需要满足以下条件:①物候期的调试。通过调整参数使模型模拟的开花期、成熟期与实际情况相符。②生物量累积的调试。如果模拟的生物量累积速率太快或者太慢,则需要调试影响叶片以及冠层光合作用的参数,使模型模拟特定日期的生物量和实测的生物量相符。③使模型模拟的冬小麦成熟期的最终地上生物量及籽粒产量和实测数据相符。

1.2.2 蒸发蒸腾模拟

(1) Priestley - Taylor 方法

CSM - CERES - Wheat 模型中作物蒸发蒸腾量可由 Priestley - Taylor (PT) 方法计算,需要的气象输入参数为逐日太阳辐射、最高气温、最低气温,该方法为模型中的默认方法,并且该方法假设所有的作物潜在蒸发蒸腾量相同。作物潜在蒸发蒸腾量( $E_0$ )的估算是用 RITCHIE<sup>[21-22]</sup>提出的功能性模型计算得到,其计算用到的平衡蒸散速率(Equilibrium evapotranspiration rate,  $E_{EQ}$ )由 Priestley 和 Taylor 提出,  $E_{EQ}$  的算法是用简化的 Ritchie 公式,具体计算如下

$$E_0 = \alpha E_{EQ} \tag{1}$$

$$E_{EQ} = 2.04 \times 10^{-4} S_R - 1.83 \times 10^{-4} A_{LBEDO} \cdot (0.6 T_{\max} + 0.4 T_{\min} + 29) \tag{2}$$

式中  $\alpha$ ——对流系数

$S_R$ ——太阳日照辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$A_{LBEDO}$ ——作物反照率

$T_{\max}$ ——日最高气温,℃

$T_{\min}$ ——日最低气温,℃

当温度在 5~35℃ 之间时,  $\alpha$  值为 1.1, 当温度低于 5℃ 或是高于 35℃ 时,  $\alpha$  的值分别略小于或大于 1.1<sup>[2]</sup>。

(2) FAO56 Penman - Monteith 方法

模型还可以用 FAO56 Penman - Monteith (PM) 方法计算作物蒸发蒸腾量,该方法还需要 2 m 处的

风速和日相对湿度作为输入参数<sup>[23]</sup>。具体计算公式如下

$$E_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \tag{3}$$

式中  $R_n$ ——作物表面净辐射, MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $G$ ——土壤热通量密度, MJ/(m<sup>2</sup>·d)  
 $T$ ——2 m 高处的平均气温,℃  
 $u_2$ ——2 m 高处的风速, m/s  
 $e_s$ ——饱和水汽压, kPa  
 $e_a$ ——实际水汽压, kPa  
 $\Delta$ ——温度水汽压曲线的斜率, kPa/℃  
 $\gamma$ ——温度计常数, kPa/℃

与 PT 方法相同,模型中使用的 PM 方法也不考虑作物系数  $K_c$ ,并且认为所有作物的潜在蒸发蒸腾量是相同的。

作物潜在蒸发蒸腾量分为潜在作物蒸腾(Potential plant transpiration,  $EP_0$ )和潜在土壤蒸发(Potential soil evaporation,  $ES_0$ )两部分。其中

$$EP_0 = E_0 (1 - \exp(-K_{EP} L_{AI})) \tag{4}$$

$$ES_0 = E_0 - EP_0 \tag{5}$$

式中  $K_{EP}$  定义为作物冠层对太阳总辐射的能源消光系数,用来划分  $EP_0$  和  $ES_0$ ,其默认值为 0.685<sup>[24]</sup>。

1.2.3 土壤水分模拟

CSM - CERES - Wheat 模型的土壤水分平衡模拟模块是由 RITCHIE 等<sup>[25]</sup>开发的,先将土壤分层(最多 10 层),然后根据水量平衡法<sup>[26]</sup>采用一维“翻桶式”<sup>[5]</sup>来逐层模拟土壤水分运动和根系吸水。输入参数为土壤的凋萎含水率、田间持水量、土壤饱和含水率以及播种时期各层土壤的体积含水率。同时需要各层土壤的根系加权因子,当权重为最大值 1 时,代表该层土壤最适合根系生长;当权重为最小值 0 时,代表该层土壤不适合根系生长。另外还需要其他的输入参数,如土壤表层反照率、第一阶段土壤蒸发上限、地表径流曲线数以及排水系数。模型是通过比较潜在蒸腾(或植物水分需求)和潜在根系吸水(或植物可吸收的土壤水)之间的大小关系来确定作物是否受水分胁迫。当土壤水分充足且丰富时,潜在根系吸水大于潜在蒸腾。随着土壤水分减少,土壤水分的电导率以及潜在根系吸水也随之减少。当潜在根系吸水减少到一个阈值时,就会出现第 1 个水分胁迫因子(Turgor factor,  $T_{URFAC}$ ) (图 1)<sup>[27]</sup>。由于许多作物中的膨压减少,导致该水分胁迫因子主要影响作物的伸展性生长,如叶片的伸展、分枝及分蘖等。与其他生长发育过程相比,作物的伸展性生长过程一般对水分胁迫更为敏感。当

潜在蒸腾大于潜在根系吸水时,会出现第 2 个水分胁迫因子 (Second water stress factor,  $S_{WFAC}$ ) (图 1), 主要影响作物光合作用。

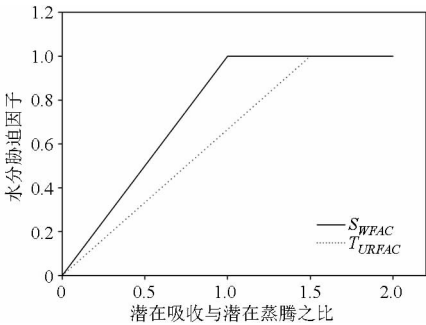


图 1 CERES - Wheat 模型中水分潜在吸收与潜在蒸腾之比和水分胁迫因子  $S_{WFAC}$  及  $T_{URFAC}$  的关系  
Fig. 1 Relationships of water stress factors  $S_{WFAC}$  and  $T_{URFAC}$  used in CSM - CERES - Wheat model with ratio of potential water uptake ( $EP_r$ ) to potential transpiration ( $EP_0$ )

模型中用以下公式计算  $T_{URFAC}$  和  $S_{WFAC}$

$$T_{URFAC} = \frac{EP_r}{R_{WUEP_1} EP_0} \quad (6)$$
$$S_{WFAC} = \frac{EP_r}{EP_0} \quad (7)$$

式中  $EP_r$ ——潜在根系吸水  
 $R_{WUEP_1}$ ——物种特性参数,目前在 DSSAT 所有的作物中均设置为 1.5

当没有水分胁迫时,2 个因子值均为 1.0。当水分胁迫出现时,2 个因子会变成 0 ~ 1 范围内的值,并且值越小表示水分胁迫越大。

1.2.4 模型评价

为了评价模型的精度,本文采用模型评价中应用较多的统计量标准化均方根误差 ( $R_{RMSEn}$ ) 和一致性指数 ( $d$ )<sup>[28]</sup> 来评价模拟值与实测值的相对差异程度。 $R_{RMSEn}$  和  $d$  的表达式为

$$R_{RMSEn} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \frac{100}{\bar{O}} \quad (8)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \quad (0 \leq d \leq 1) \quad (9)$$

式中  $P_i$ ——第  $i$  个模拟值  
 $O_i$ ——第  $i$  个实测值  
 $\bar{O}$ ——实测值的平均  
 $n$ ——统计样本数

一般认为, $R_{RMSEn}$  值越小, $d$  越大,表明模拟值与实测值的差异越小,即模型的模拟结果越准确、可靠。 $R_{RMSEn}$  小于 10%,表明模拟结果非常好; $R_{RMSEn}$

介于 10% ~ 20% 之间,表明模拟结果较好; $R_{RMSEn}$  介于 20% ~ 30% 之间,表明模拟结果一般, $R_{RMSEn}$  大于 30% 表明模拟结果差。

2 结果与分析

2.1 冬小麦蒸发蒸腾量

2.1.1 生育期累积蒸发蒸腾量

由于仅对模型模拟的冬小麦物候期、生物量以及产量数据进行了校正,因此可以使用 CK 处理实测的蒸发蒸腾量数据对模型模拟的蒸发蒸腾量进行评价。分别用 PT 和 PM 2 种方法模拟的蒸发蒸腾量与大型称量式蒸渗仪实测的蒸发蒸腾量进行比较。2011—2012 年生长季,蒸渗仪的实际测数据以及 PT 和 PM 方法模拟的蒸发蒸腾量分别为 341.9、338.0、342.5 mm。2012—2013 年生长季,蒸渗仪的实测值与 PT 和 PM 方法的模拟值分别为 384.7、371.8、391.6 mm。图 2 所示为 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季的实测和模拟的累积蒸发蒸腾量。从图中可以看出,模型模拟的冬小麦蒸发蒸腾量与蒸渗仪实测值的吻合度较好,且模型对 2012—2013 年生长季的模拟结果较 2011—2012 年生长季好。在 2011—2012 年生长季,用 PT 方法模拟的累积蒸发蒸腾量均小于蒸渗仪的实测值,且 2012—2013 年生长季的模拟情况与第 1 年类似。对于 PM 方法,在第 1 个生长季与 PT 方法的模拟情况类似,模拟的累积蒸发蒸腾量小于蒸渗仪的实测值。而在 2012—2013 年生长季,PM 方法模拟的累积蒸发蒸腾量从播种后 188 d 开始高于蒸渗仪的实测值。在 2 个生长季用 PM 方法模拟的累积  $ET$  值与蒸渗仪实测值的吻合度均比 PT 方法好,且 PT 方法模拟得到的蒸发蒸腾量小于 PM 方法的模拟值。两种方法的主要误差是来自于  $EP_0$  之间的差异<sup>[29]</sup>,并且造成这种误差的主要原因是:① PT 方法与 PM 方法相比,没有考虑空气动力学方面的影响<sup>[1]</sup>,PM 方法中空气动力项与辐射项之比都是影响 PT 方法应用效果的重要因子,且二者呈显著负相关,若该比值越小,PT 方法的应用效果相对较好,反之,该比值越大,应用效果较差<sup>[30]</sup>。② PT 方法采用水量平衡法模拟得到的下渗量值要高于 PM 方法的模拟值<sup>[29]</sup>,因此计算得到的蒸发蒸腾量值较小。2011—2012 年,PT 方法和 PM 方法的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 18.16%、0.988 和 12.99%、0.994。2012—2013 年,PT 方法和 PM 方法的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 16.14%、0.991 和 7.49%、0.998。

表 2 所示为 2011—2012 和 2012—2013 年 2 个

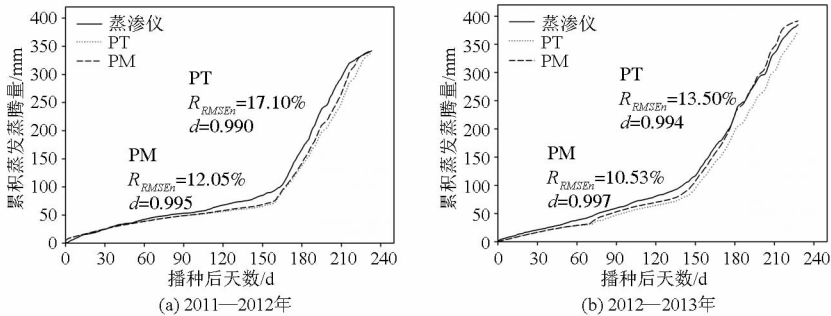


图2 2011—2012 和 2012—2013 年生长季 Priestley - Taylor (PT) 和 Penman - Monteith (PM) 方法模拟的累积蒸发蒸腾量与大型蒸渗仪的实测值的对比(CK 处理)

Fig.2 Comparisons of cumulative evapotranspiration simulated by using Priestley - Taylor (PT) and Penman - Monteith (PM) approaches with measured values by using weighing lysimeter for CK treatment in 2011—2012 and 2012—2013 growing seasons

生长季,模型基于 PT 和 PM 方法对不同水分胁迫处理的生育期内累积蒸发蒸腾量模拟值比较。由表 2 可以看出,模型基于 PT 方法的模拟值均小于 PM 方法的模拟结果,且 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季相对误差变化范围分别为  $-2.63\% \sim -0.05\%$  和  $-3.11\% \sim -0.19\%$ 。基于 2 种方法模拟得到相对误差较大的处理均为 T2 处理,该处理较其他处理的水分胁迫较小,而对水分胁迫相对较大的处理,如 T3、T7 及 T8 处理,基于 2 种方法模拟的相对误差值较小( $\pm 1.5\%$  以内)。造成这种结果的原因可能为,模型基于 2 种蒸发蒸腾量估算方法对水分胁迫较大的处理需水量模拟差异较小。

表 2 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 Priestley - Taylor (PT) 和 Penman - Monteith (PM) 方法模拟不同水分胁迫处理累积蒸发蒸腾量的对比

Tab.2 Comparisons of simulated cumulative evapotranspiration using Priestley - Taylor (PT) and Penman - Monteith (PM) approaches for different water deficit treatments in 2011—2012 and 2012—2013 growing seasons

| 处理 | 2011—2012 年 |            |            | 2012—2013 年 |            |            |
|----|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
|    | PT          | PM         | 相对<br>误差/% | PT          | PM         | 相对<br>误差/% |
|    | 模拟值/<br>mm  | 模拟值/<br>mm |            | 模拟值/<br>mm  | 模拟值/<br>mm |            |
| T2 | 325.50      | 328.13     | -2.63      | 327.30      | 330.41     | -3.11      |
| T3 | 298.65      | 300.07     | -1.43      | 289.88      | 290.05     | -0.17      |
| T4 | 298.54      | 299.72     | -1.18      | 316.03      | 317.91     | -1.88      |
| T5 | 311.50      | 313.27     | -1.77      | 314.43      | 315.03     | -0.61      |
| T6 | 325.72      | 328.12     | -2.40      | 313.94      | 315.36     | -1.43      |
| T7 | 283.75      | 283.80     | -0.05      | 302.41      | 303.53     | -1.13      |
| T8 | 297.99      | 298.60     | -0.61      | 302.86      | 303.05     | -0.19      |
| T9 | 310.83      | 311.98     | -1.15      | 299.21      | 300.49     | -1.28      |

2.1.2 逐日蒸发蒸腾量

在冬小麦的生育期内,用 PT 和 PM 方法模拟的逐日蒸发蒸腾量与蒸渗仪实测的逐日蒸发蒸腾量存在误差,但整体趋势一致(图 3)。2011—2012 年生

长季,蒸渗仪实测值以及用 PT 和 PM 方法模拟的日平均蒸发蒸腾量分别为 1.461、1.444、1.463 mm/d。2012—2013 年生长季,蒸渗仪的实测值与 PT 和 PM 方法的模拟值分别为 1.680、1.623、1.710 mm/d。假设蒸渗仪的实测数据是准确的,则使用 2 种方法模拟的日蒸发蒸腾量与实测值的误差在 4% 以内。由图 3 还可以看出在冬小麦的生育期前期,用 PT 和 PM 法模拟的蒸发蒸腾量略小于蒸渗仪的实测值,且 PT 法模拟的日蒸发蒸腾量波动范围要小于 PM 法,而在生育期后期用 2 种方法的模拟值均比实测的蒸发蒸腾量大。造成该情况的原因可能是由于在冬小麦生长后期对应的生育期为抽穗—灌浆—成熟期,这段时间为冬小麦生殖生长的旺盛时期<sup>[31]</sup>,模型模拟的蒸散强度大于实际的蒸发蒸腾量。

2.2 土壤含水率

为了评价用 CSM - CERES - Wheat 模型 PT 和 PM 2 种蒸发蒸腾量法分别对土壤含水率的模拟情况,用 2011—2012 年和 2012—2013 年的 CK 处理不同土层深度(0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm)的土壤含水率对模型的模拟结果进行验证,土层的动态模拟结果如图 4 所示。由图 4 可以看出模型用两种方法对不同土层深度的土壤含水率模拟值变化趋势与观测值一致,大部分观测值都在模拟曲线上,说明对土壤水分模拟结果较好。用 PT 方法模拟的 CK 处理 2011—2012 年以及 2012—2013 年 0 ~ 20cm 土层的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 41.0%、0.30 以及 36.4%、0.45,模拟结果较差。然而,从 20 cm 土层开始,模型模拟的精度提高,模型对 CK 处理 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 20 ~ 40 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 23.1% 和 15.8%, $d$  分别为 0.27 和 0.76。40 ~ 60 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 10.2% 和 11.8%, $d$  分别为 0.61 和 0.84。

60 ~ 80 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 16.0% 和 7.2%,  $d$  分别为 0.30 和 0.92。80 ~

100 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 9.9% 和 15.2%,  $d$  分别为 0.39 和 0.62。

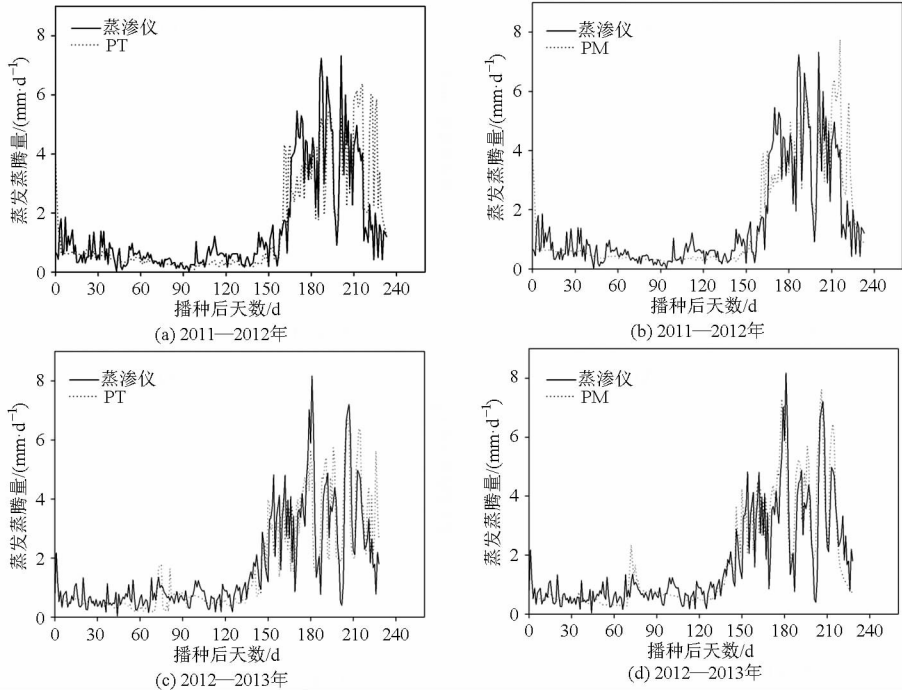


图 3 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 Priestley - Taylor (PT) 和 Penman - Monteith (PM) 方法模拟的日蒸发蒸腾量与大型蒸渗仪的实测值的对比(CK 处理)

Fig. 3 Comparisons of daily evapotranspiration simulated by using Priestley - Taylor (PT) and Penman - Monteith (PM) approaches with measured values by using weighing lysimeter for CK treatment in 2011—2012 and 2012—2013 growing seasons

PM 方法的模拟结果与 PT 方法类似,对 0 ~ 20 cm 土层的土壤含水率模拟精度较低,从 20 cm 土层开始,模型模拟的精度提高。一般来说,用 PM 方法在 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 以及 40 ~ 60 cm 土层的模拟结果比 PT 方法的模拟结果好,而对较深土层(60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm)的模拟则表现为用 PT 方法的模拟结果略好。在 0 ~ 20 cm,模型对 CK 处理在 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 43.1%、37.0% 以及 0.29、0.45。20 ~ 40 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 22.6% 和 14.8%,  $d$  分别为 0.24 和 0.82。40 ~ 60 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 6.9% 和 9.6%,  $d$  分别为 0.71 和 0.92。60 ~ 80 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 18.3% 和 9.6%,  $d$  分别为 0.24 和 0.88。80 ~ 100 cm 土壤含水率模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 10.1% 和 13.1%,  $d$  分别为 0.38 和 0.74。从图 4 还可以看出,土壤表层(10 ~ 20 cm)的含水率变化波动较大,40 cm 以下土壤含水率波动变小,并且无论是 PT 方法还是 PM 方法均可准确地模拟不同土层深度土壤含水率的变化情况。PT 方法和 PM 方法的模拟结果与实测值的吻合度基本一致,但是整体模拟结果为基于 PT 方法模拟

的土壤含水率值高于 PM 方法的模拟结果。造成这种结果的原因为 PT 方法模拟的蒸发蒸腾量要低于 PM 方法,从而导致模型基于 PT 方法模拟的作物潜在根系吸水即植物可吸收的土壤水较大。

2.3 成熟期地上干物质模拟

PT 方法对 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 T2 ~ T9 的作物生物量的模拟结果如表 3 所示。在 2011—2012 年生长季,模型模拟值与实测值的差异范围为 -21.89% ~ -0.42%,且模拟值小于实测值,模型对于 T2 ~ T9 处理的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 15.02% 和 0.52。 $R_{RMSEn}$  位于 10% ~ 20% 区间内,表明模拟结果较好。在 2012—2013 年生长季,模型模拟值与实测值的差异变化范围为 -16.15% ~ 19.48%,其差异范围远远大于 2011—2012 年生长季,且模型对不同处理生物量的模拟既有高估也有低估的情况,模型对于 T2 ~ T9 处理模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 12.12% 和 0.54,模拟结果一般。总体来说,PT 方法对 2 个生长季的地上生物量模拟,2012—2013 年生长季的模拟结果略好于 2011—2012 年生长季。

在 2011—2012 年生长季,用 PM 方法的模拟值与实测值的差异变化范围为 -28.52% ~ -8.38%,且模拟值小于实测值,模型对于 T2 ~ T9 处理的模

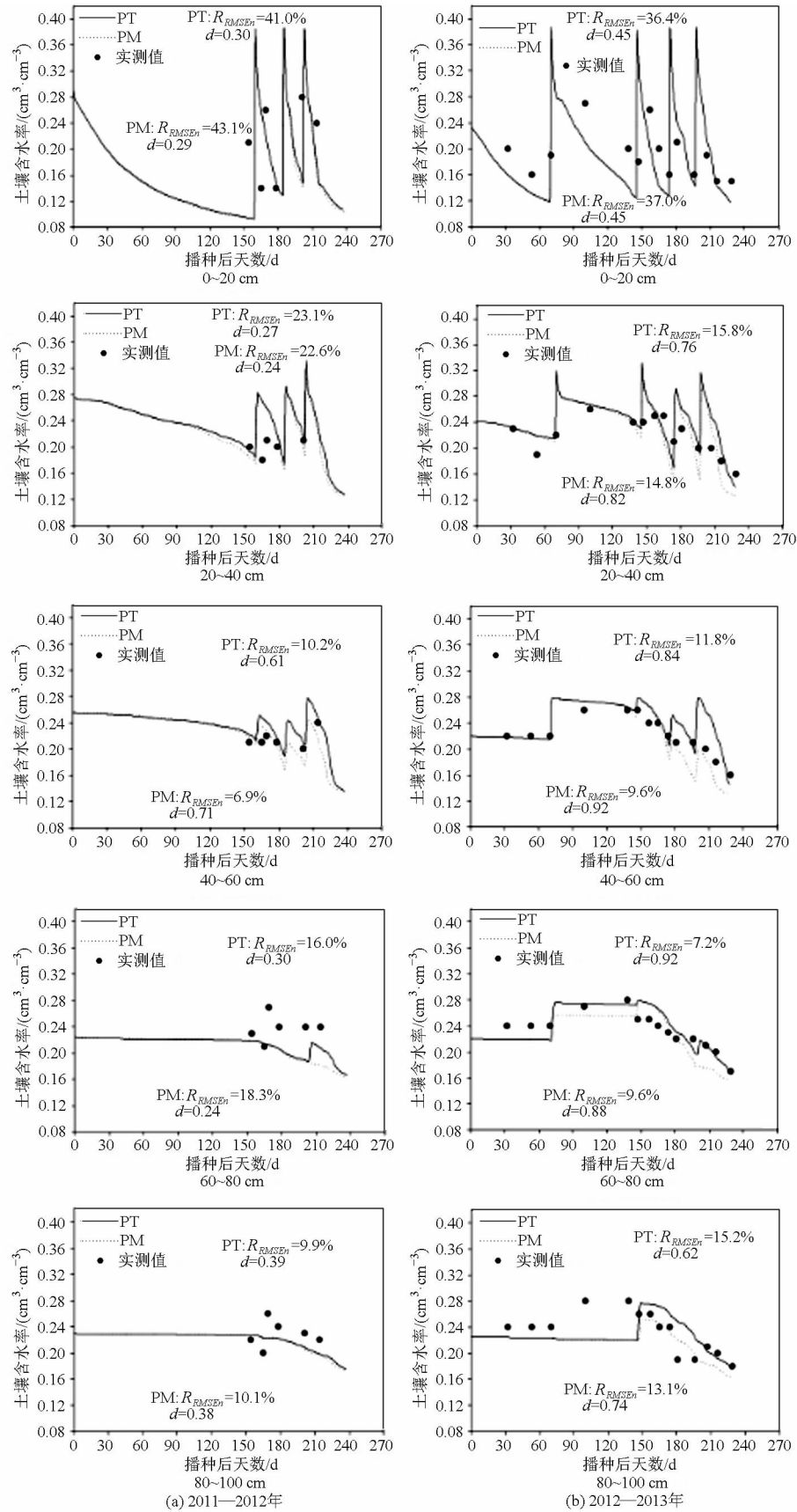


图 4 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 Priestley - Taylor (PT) 和 Penman - Monteith (PM) 方法模拟的土壤含水率与实测值的对比 (CK 处理)

Fig. 4 Comparisons of soil water content simulated by using Priestley - Taylor (PT) and FAO56 Penman - Monteith (PM) approaches with measured values for CK treatment in 2011—2012 and 2012—2013 growing seasons

拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 21.34% 和 0.43。 $R_{RMSEn}$  位于 20% ~ 30% 区间内,表明模拟结果一般。在 2012—2013 年生长季,模型模拟值与实测值的差异变化范围为 -32.36% ~ -2.61%,与 PT 方法相同,其差异范围也远远大于 2011—2012 年生长季,模拟值均小于实测值,模型对于 T2 ~ T9 处理的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 24.19% 和 0.47,模拟精度较低。与 PT 方法模拟结果相反,PM 方法对 2 个生长季生物量的模拟,2011—2012 年生长季的模拟略好于 2012—2013 年生长季。

表 3 CSM – CERES – Wheat 模型基于 2 种蒸发蒸腾量计算方法对 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季不同水分处理条件下冬小麦地上生物量的模拟值与实测值

| 处理             | 2011—2012 年               |        |       |        |        |  | 2012—2013 年               |        |       |        |        |
|----------------|---------------------------|--------|-------|--------|--------|--|---------------------------|--------|-------|--------|--------|
|                | 生物量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |        |       | 差异/%   |        |  | 生物量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |        |       | 差异/%   |        |
|                | PT 模拟值                    | PM 模拟值 | 实测值   | PT 模拟值 | PM 模拟值 |  | PT 模拟值                    | PM 模拟值 | 实测值   | PT 模拟值 | PM 模拟值 |
| T2             | 14.04                     | 12.94  | 15.92 | -11.78 | -18.72 |  | 14.48                     | 12.18  | 15.64 | -7.42  | -22.16 |
| T3             | 12.26                     | 11.38  | 13.55 | -9.52  | -16.03 |  | 12.27                     | 9.86   | 13.96 | -12.11 | -29.37 |
| T4             | 12.27                     | 11.32  | 13.95 | -12.03 | -18.91 |  | 13.74                     | 11.67  | 11.99 | 14.58  | -2.61  |
| T5             | 13.19                     | 12.12  | 14.74 | -10.52 | -17.78 |  | 13.83                     | 11.23  | 14.47 | -4.40  | -22.37 |
| T6             | 14.10                     | 12.91  | 18.06 | -21.89 | -28.52 |  | 13.60                     | 10.97  | 16.22 | -16.15 | -32.36 |
| T7             | 11.41                     | 10.51  | 13.82 | -17.48 | -23.97 |  | 13.08                     | 10.74  | 12.52 | 4.49   | -14.21 |
| T8             | 12.15                     | 11.23  | 14.88 | -18.37 | -24.50 |  | 12.99                     | 10.51  | 14.79 | -12.17 | -28.97 |
| T9             | 13.13                     | 12.08  | 13.18 | -0.42  | -8.38  |  | 12.51                     | 10.15  | 10.47 | 19.48  | -3.06  |
| $R_{RMSEn}/\%$ |                           |        |       | 15.02  | 21.34  |  |                           |        |       | 12.12  | 24.19  |
| $d$            |                           |        |       | 0.52   | 0.43   |  |                           |        |       | 0.54   | 0.47   |

2.4 产量模拟

基于 PT 方法对 2011—2012 年和 2012—2013 年生长季 T2 ~ T9 产量的模拟结果如表 4 所示。在 2011—2012 年生长季,模型模拟值与实测值的差异变化范围为 -8.24% ~ 10.22%,且模拟值仅在 T8 和 T9 水分胁迫较为严重的 2 个处理中高于实测值,其余处理模拟值均小于实测值;模型对于 T2 ~ T9 处理模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 6.12% 和 0.94。 $R_{RMSEn}$  值小于 10%,表明模拟结果非常好。在 2012—2013 年生长季,模型模拟值与实测值的差异范围为 -2.97% ~ 46.7%,其差异范围要远远大于 2011—2012 年生长季;模型对于 T2 ~ T9 处理模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 17.74% 和 0.47, $R_{RMSEn}$  位于 10% ~ 20% 区间内,模拟精度较高。总体来说,基于 PT 方法对 2 个生长季的产量模拟,2011—2012 年生长季的模拟结果明显好于

表 4 CSM – CERES – Wheat 模型基于 2 种蒸发蒸腾量计算方法对 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季不同水分处理条件下冬小麦产量的模拟值与实测值

| 处理             | 2011—2012 年              |        |      |        |        |  | 2012—2013 年              |        |      |        |        |
|----------------|--------------------------|--------|------|--------|--------|--|--------------------------|--------|------|--------|--------|
|                | 产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |        |      | 差异/%   |        |  | 产量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |        |      | 差异/%   |        |
|                | PT 模拟值                   | PM 模拟值 | 实测值  | PT 模拟值 | PM 模拟值 |  | PT 模拟值                   | PM 模拟值 | 实测值  | PT 模拟值 | PM 模拟值 |
| T2             | 6.97                     | 5.98   | 7.02 | -0.73  | -14.84 |  | 7.83                     | 6.51   | 6.44 | 21.66  | 1.10   |
| T3             | 5.45                     | 5.27   | 5.90 | -7.58  | -10.71 |  | 6.54                     | 5.62   | 6.31 | 3.54   | -10.98 |
| T4             | 5.43                     | 4.99   | 5.82 | -6.64  | -14.22 |  | 6.86                     | 6.43   | 5.52 | 24.19  | 16.49  |
| T5             | 6.39                     | 5.50   | 6.65 | -3.96  | -17.30 |  | 7.23                     | 5.75   | 6.86 | 5.34   | -16.11 |
| T6             | 6.90                     | 5.93   | 7.27 | -5.10  | -18.51 |  | 7.22                     | 5.49   | 7.31 | -1.30  | -24.93 |
| T7             | 4.84                     | 4.44   | 5.27 | -8.24  | -15.76 |  | 7.01                     | 5.82   | 5.69 | 23.25  | 2.27   |
| T8             | 5.31                     | 4.67   | 4.81 | 10.22  | -3.05  |  | 6.35                     | 5.18   | 6.54 | -2.97  | -20.78 |
| T9             | 6.44                     | 5.49   | 6.09 | 5.82   | -9.90  |  | 6.32                     | 4.95   | 4.30 | 46.70  | 14.99  |
| $R_{RMSEn}/\%$ |                          |        |      | 6.12   | 14.63  |  |                          |        |      | 17.74  | 16.21  |
| $d$            |                          |        |      | 0.94   | 0.70   |  |                          |        |      | 0.47   | 0.57   |

2012—2013 年生长季。

基于 PM 方法 2011—2012 年生长季 T2 ~ T9 处理产量的模拟结果比基于 PT 方法的模拟结果略差,而 2012—2013 年生长季产量的模拟结果要略好于基于 PT 方法的模拟结果。在 2011—2012 年生长季,模型模拟值与实测值的差异变化范围为 -18.51% ~ -3.05%,且模拟值均小于实测值;模型对 T2 ~ T9 处理的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 14.63% 和 0.70。 $R_{RMSEn}$  值位于 10% ~ 20% 区间内,模拟结果一般。在 2012—2013 年生长季,模型的模拟值与实测值的差异变化范围为 -24.93% ~ 16.49%,与 PT 方法相同,其差异变化范围也远远大于 2011—2012 年生长季,模型对于 T2 ~ T9 处理产量的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  和  $d$  分别为 16.21% 和 0.57,模拟结果较好。PM 方法对 2 个生长季产量的模拟情况为 2011—2012 年生长季的模拟要好于 2012—2013 年生长季。

### 3 讨论

#### 3.1 不同蒸发蒸腾量方法对冬小麦蒸发蒸腾量及土壤含水量的模拟影响

CSM - CERES - Wheat 模型基于不同的蒸发蒸腾量公式,对冬小麦生育期内蒸发蒸腾量和土壤水分动态模拟的结果不同。本文对 CSM - CERES - Wheat 模型用 Priestley - Taylor 和 Penman - Monteith 2 种估算冬小麦蒸发蒸腾量的方法进行了模拟研究,结果表明用 PT 方法的蒸发蒸腾量小于 PM 方法。例如,在 2011—2012 年和 2012—2013 年 2 个生长季,PT 方法比 PM 方法模拟的蒸发蒸腾量分别低 1.3% 和 5.0%。这与 ANOTHAI 等<sup>[3]</sup>用 CSM - CERES - Maize 模型模拟的蒸发蒸腾量与波文比—能量平衡仪器的实测值对比研究结果类似,表明 PM 方法的模拟结果比 PT 方法的准确性高,且用 PT 方法的模拟结果比用 PM 方法模拟的蒸发蒸腾量小 3.8% ~ 8.5%。而 DUGAS 等<sup>[32]</sup>在使用 2 种方法进行模拟后发现,模拟结果误差较大,在 CERES 模型中 PT 方法和 PM 方法模拟结果是:在高粱生育期内,PT 方法模拟的腾发量比 PM 方法小 42% ~ 70%;在小麦全生育期内,前者比后者小 60% ~ 81%;在玉米全生育期内,前者比后者小 35% ~ 46%。造成误差较大的原因可能是:试验地区处于相对湿度较高的地区,而 PT 法没有考虑相对湿度的影响,当相对湿度明显增加时,造成该法计算结果偏大<sup>[33]</sup>。

除了用 CSM - CERES - Wheat 模型对不同蒸发蒸腾量估算方法进行模拟研究外,也有不少研究对不同蒸散模型对的  $ET_0$  计算结果进行了对比分析。

袁小环等<sup>[34]</sup>针对矮型参考作物的评价方法,应用蒸渗仪实测法评价了 Penman - Monteith、Hargreaves - Samnai、Priestley - Taylor 以及 Penman - van Bavel 模型在北京地区  $ET_0$  计算中的准确性,结果表明输入参数不同导致  $ET_0$  计算出现不同方向的偏差,其中在月尺度上,Priestley - Taylor 模型低估,而其他模型则高估了蒸散量。米娜等<sup>[35]</sup>采用涡度相关法的观测值为标准,比较分析了 Hargreaves、FAO Penman - Monteith 和 Priestley - Taylor 蒸散模型对玉米农田蒸散量的模拟精度,研究表明作物系数采用分段单值法时 Priestley - Taylor 公式模拟结果最优。其结果与其他研究结果不一致的原因可能为参照标准的不同。赵璐等<sup>[36]</sup>用不同  $ET_0$  计算方法对川中丘陵地区的  $ET_0$  进行拟合计算,并以 PM 方法的计算结果为标准,对其他计算方法的精度进行比较和改进,结果表明,Hargreaves 校正法和 Priestley - Taylor 法计算误差较小,可以取代 PM 法作为川中丘陵地区气象资料缺乏条件下计算  $ET_0$  的方法。在欧洲和美国多个地区的试验研究后, Penman - Monteith 公式被认为普适性最好,因此被 FAO 采纳用作估测  $ET_0$  的标准模型<sup>[9]</sup>,中国也多以 Penman - Monteith 模型为标准评价其他模型的适用性<sup>[34]</sup>,或者以蒸渗仪实测数据评价模型的适用性<sup>[37-38]</sup>。

#### 3.2 不同蒸发蒸腾量方法对冬小麦生物量及产量的模拟影响

模型对蒸发蒸腾量模拟的精确度直接决定了模型对作物地上生物量、产量指标等的模拟结果,同时对模型的应用以及提供决策分析和技术支持均产生重要影响。若计算的作物需水量偏低,将导致模拟的土壤含水率较高,最后使模型模拟的生物量累积及产量偏高。本研究中 Priestley - Taylor 方法计算的参照作物蒸发蒸腾量略低于 Penman - Monteith 方法,因此,基于这 2 种蒸发蒸腾量计算方法,模型对成熟期地上生物量和产量的模拟结果总体表现为基于 PT 方法的模拟值均高于 PM 方法。例如,在 2011—2012 年和 2012—2013 年的 2 个生长季,PT 方法对冬小麦成熟期地上生物量的模拟值比用 PM 方法分别高 7.75% ~ 9.27% 和 17.65% ~ 24.44%,PT 方法对冬小麦产量的模拟值比用 PM 方法分别高 3.51% ~ 17.44% 和 6.61% ~ 31.47%。另外,本研究表明 PT 方法的模拟结果比 PM 方法模拟结果拟合度好。这可能与模型的校正参数有关,参数校正后的模型模拟的生物量和产量均略低于实测值,而由于基于 PT 方法模拟的产量高于 PM 方法的模拟值,因此与实测值更接近,导致模拟结果的吻合度更高。ANOTHAI 等<sup>[3]</sup>基于这 2 种方法用 CSM -

CERES - Maize 模型对玉米的生物量和产量进行模拟时,表现为 PM 方法的模拟结果比 PT 方法好。UTSET 等<sup>[29]</sup>通过模拟地中海式条件下 2 种蒸发蒸腾量计算方法对玉米水分利用的情况,结果表明尽管基于 PT 方法模拟得到的参考作物腾发量的低于 PM 方法,但是用 2 种方法模拟的玉米水分利用及土壤含水率有相同的统计分析值,并且用模型做决策分析时,2 种方法模拟的结果均非常好。说明这 2 种经验公式均可以用于作物模型计算参考作物蒸散量,并且当气象资料不足时,完全可以用 PT 方法代替 PM 方法计算参考作物。

CERES - Wheat 模型对不同水分处理情况的地上生物量的模拟结果均不相同,用 PT 方法模拟的地上生物量范围为 11.4 1 ~ 14.10 t/hm<sup>2</sup> (2011—2012 年),12.51 ~ 14.48 t/hm<sup>2</sup> (2012—2013 年)。用 PM 方法模拟地上生物量范围为 10.51 ~ 12.94 t/hm<sup>2</sup> (2011—2012 年),9.86 ~ 12.18 t/hm<sup>2</sup> (2012—2013 年)。模型对大多数处理的生物量模拟值均小于实测值。这可能是因为该试验为遮雨棚下的小区试验,没有降雨量的输入,模型在模拟过程出现水分胁迫,模拟的地上生物量值较小,或是由于作物遗传参数的选择导致模型的模拟值较小。类似的,SINGH 等<sup>[39]</sup>通过对不同水氮处理下的 CSM - CERES - Wheat 以及 CropSyst 模型的研究,指出 CSM - CERES - Wheat 模型对生物量的模拟结果并不理想,该模型对所有不同水氮处理下的生物量模拟值均低于实测值。基于 PT 和 PM 方法对 2 年生物量的模拟情况,误差较大的情况均出现在处理 T6 的模拟,两种方法的模拟值均显著低于实测值。其原因可能为 T6 处理在生育期的前期有中度到重度的水分胁迫,而在拔节期复水后,冬小麦快速生长<sup>[40]</sup>,而 CERES - Wheat 没能准确模拟。因此,该模块还需要进一步改进。

模型对不同水分处理下的产量模拟结果也不尽相同,基于 PT 方法模拟产量范围为 4.84 ~ 6.97 t/hm<sup>2</sup> (2011—2012 年)和 6.32 ~ 7.83 t/hm<sup>2</sup> (2012—2013 年)。基于 PM 方法模拟产量范围为 4.44 ~ 5.98 t/hm<sup>2</sup> (2011—2012 年)和 4.95 ~ 6.51 t/hm<sup>2</sup> (2012—2013 年)。基于 PT 和 PM 方法的冬小麦的产量的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  分别为 11.80% 和 15.42%,模拟结果较好。JI 等<sup>[20]</sup>通过校正后的 CSM - CERES - Wheat 模型的作物参数,对关中地区冬小麦产量和生物量的模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  为 5.71% 和 7.77%,模拟精度很高;XIONG 等<sup>[41]</sup>通过对 CERES - Wheat 模型参数校正对中国 34 个地区的春小麦

(114 个生长季)以及 107 个地区的冬小麦(321 个生长季)产量模拟,模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  为 22.8%,模拟值与农户调查值的  $R_{RMSEn}$  为 27%,模拟结果一般。以上研究表明,CSM - CERES - Wheat 模型在不同的气候、土壤等条件下均表现良好,可将其作为决策工具为决策者提供正确、及时的决策支持。

本研究仅以杨凌一个站点的气象资料对基于 2 种蒸发蒸腾量估算方法的结果进行了比较,试验使用的作物品种单一,时间序列较短,对于其他地区以及其他作物的研究成果如何,有待更多试验资料的分析验证。基于 PT 和 PM 2 种方法对小麦及其他作物的模拟及精度的比较也还需要进一步研究,以最大优化 CSM - CERES - Wheat 的模拟结果。

## 4 结论

(1) CSM - CERES - Wheat 模型基于 PM 方法和 PT 方法模拟的冬小麦日蒸发蒸腾速率以及全生育期内的累积蒸发蒸腾量的结果与大型蒸渗仪的实测结果吻合度较高,归一化均方根误差  $R_{RMSEn}$  在 19% 以内,说明这 2 种经验公式均可以用于作物模型计算干旱-半干旱地区作物的蒸发蒸腾量。用 2 种方法分别对具有水分胁迫的处理进行模拟,基于 PT 方法模拟的冬小麦生育期内累积蒸发蒸腾量低于基于 PM 方法的模拟值。

(2) CSM - CERES - Wheat 模型基于 2 种方法均可以对不同深度土壤含水率进行模拟。模型对上层(0 ~ 20 cm)土壤含水率模拟精度较差( $R_{RMSEn} > 30\%$ ),而对下层(40 ~ 100 cm)土壤含水率模拟精度较高,模拟值与实测值的  $R_{RMSEn}$  小于 16%。且不同土层的水分变异程度随深度增加而减小。

(3) 与大型蒸渗仪的实测结果相比,模型基于 PM 方法模拟的冬小麦日蒸发蒸腾速率以及全生育期内的累积蒸发蒸腾量的结果好于基于 PT 方法的模拟结果。因此,当日相对湿度和风速的气象资料充足时,建议使用 PM 方法用于模型中的蒸发蒸腾量计算。

(4) 模型对冬小麦的地上生物量和产量的模拟结果较好,用 PT 方法对 2 个生长季的地上生物量和产量模拟值和实测值的平均  $R_{RMSEn}$  分别为 13.57%、11.80%;用 PM 方法对 2 个生长季地上生物量和产量模拟值和实测值的平均  $R_{RMSEn}$  分别为 22.76%、15.42%。模型对产量的模拟结果好于对地上生物量的模拟结果,且模型对有水分胁迫处理的模拟结果较差,还需要进一步改进。

## 参 考 文 献

- 1 刘晓英,林而达,刘培军. Priestley – Taylor 与 Penman 法计算参照作物腾发量的结果比较[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 32 – 36.  
LIU X Y, LIN E D, LIU P J. Comparative study on Priestley – Taylor and Penman methods in calculating reference crop evapotranspiration [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 32 – 36. (in Chinese)
- 2 SAU F, BOOTE K J, BOSTICK W M, et al. Testing and improving evapotranspiration and soil water balance of the DSSAT crop models [J]. Agronomy Journal, 2004, 96(5): 1243 – 1257.
- 3 ANOTHAI J, SOLER C M T, GREEN A, et al. Evaluation of two evapotranspiration approaches simulated with the CSM – CERES – Maize model under different irrigation strategies and the impact on maize growth, development and soil moisture content for semi-arid conditions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 176: 64 – 76.
- 4 HOOGENBOOM G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(1 – 2): 137 – 157.
- 5 JONES J W, HOOGENBOOM G, PORTER C H, et al. The DSSAT cropping system model [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3 – 4): 235 – 265.
- 6 BLANEY H F, CRIDDLE W D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data [C] // USDA Conservation Service, SCS – TP – 96, 1950.
- 7 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.
- 8 HARGREAVES G H. Estimation of potential and crop evapotranspiration [J]. Transactions of the ASAE, 1974, 17(4): 701 – 704.
- 9 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [C] // FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 1998.
- 10 ASARE D K, SAMMIS T W, ASSADIAN H, et al. Evaluating three cotton simulation models under different irrigation regimes [J]. Agricultural Water Management, 1992, 22(4): 391 – 407.
- 11 HUNT L A, PARARAJASINGHAM S. CROPSIM – Wheat: a model describing the growth and development of wheat [J]. Canadian Journal of Plant Science, 1995, 75(3): 619 – 632.
- 12 WILLIAMS J R, JONES A, KIRBY J R. EPIC crop growth model [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(2): 497 – 511.
- 13 张耀耀, 刘建刚, 谷中颖, 等. 气候变化对沧州地区冬小麦产量潜力的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(4): 31 – 37.  
ZHANG Y Y, LIU J G, GU Z Y, et al. Impact of climate change on potential yield of winter wheat in Cangzhou Area [J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(4): 31 – 37. (in Chinese)
- 14 ARORA V K, SINGH B. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES – Wheat model [J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1 – 3): 22 – 30.
- 15 周丽丽, 梁效贵, 高震, 等. 基于 CERES – Wheat 模型的沧州地区冬小麦需水量分析[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1320 – 1328.  
ZHOU L L, LIANG X G, GAO Z, et al. Analysis of water demand for winter wheat production in Cangzhou Area using CERES – Wheat model [J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2015, 23(10): 1320 – 1328. (in Chinese)
- 16 YANG Y H, WATANBE M, ZHANG X Y, et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang mountains in the North China Plains [J]. Agricultural Water Management, 2006, 82(1 – 2): 25 – 44.
- 17 SHOUSE P, JURY W A, STOLZY L H. Use of deterministic and empirical models to predict potential evapotranspiration in an advective environment [J]. Agronomy Journal, 1980, 72(6): 994 – 998.
- 18 JENSEN M E, BURMAN R D, ALLEN R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements (ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No. 70. ) [M]. American Society of Civil Engineers, New York, USA, 1990.
- 19 McANENEY K J, ITIER B. Operational limits to the Priestley – Taylor formula [J]. Irrigation Science, 1996, 17(1): 37 – 43.
- 20 JI J M, CAI H J, HE J Q, et al. Performance evaluation of CERES – Wheat model in Guanzhong Plain of Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2014, 144(2): 1 – 10.
- 21 RICHIE J L. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover [J]. Water Resource Research, 1972, 8(5): 1204 – 1213.
- 22 RICHIE J L. A user-oriented model of the soil water balance in wheat [M] // FRY E, ATKIN T K. Wheat growth and modeling. NATO – ASI Series. New York: Plenum Press, 1985: 293 – 305.
- 23 BOOTE K J, SAU F, HOOGENBOOM G, et al. Experience with water balance, evapotranspiration, and predictions of water stress effect in the CROPGRO model [M] // AHUJA L R, REDDY V R, SASSENDRA S A, et al. Response of Crops to Limited Water Understanding & Modeling Water Stress Effect on Plant Growth Processes, Advances in Agricultural Systems Modeling 1, 2008: 59 – 103.
- 24 DEJONGE K, ASCOUGH J, ANDALES A, et al. Improving evapotranspiration simulations in the CERES – Wheat model under limited irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 92 – 103.
- 25 RITCHIE J L, OTTER S. Description and performance of CERES – Wheat: a user-oriented wheat yield model [M] // WILLIS W O. ARS Wheat Yield Project. ARS – 38, USDA – ARS, 1985: 159 – 175.
- 26 RITCHIE J L. Soil water balance and plant water stress [M] // TSUJI G Y, HOOGENBOOM G, THORNTON P K.

Understanding Options for Agricultural Production. Dordrech, Netherlands: Kluver Academic, 1998:41 – 54.

27 HE J Q, CAI H J, BAI J. 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.

28 TIMSINA J, HUMPHREYS E. Performance of CERES – Rice and CERES – Wheat models in rice-wheat systems; a review [J]. Agricultural Systems, 2006, 90(1 – 3): 5 – 31.

29 UTSET A, FARRE I, MARTINEZ-COB A, et al. 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.

30 刘晓英, 林而达, 刘培军. 干旱气候条件下 Priestley – Taylor 方法应用探讨[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 31 – 38.  
LIU X Y, LIN E D, LIU P J. Study on application of Priestly – Taylor method to dry climate condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 31 – 38. (in Chinese)

31 王子申, 蔡焕杰, 虞连玉, 等. 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.  
WANG Z S, CAI H J, YU L Y, et al. Estimation of evapotranspiration and soil evaporation of winter whent in arid region of Northwest China based on SIMDualKc model [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 126 – 136. (in Chinese)

32 DUGAS W A, ANINSWORTH C G. Agroclimatic atlas of Texas. Part 6. Potential evapotraspiration [C] // Texas Agricultural Experiment Station. Mp – 1543.

33 闫浩芳, 史海滨, 薛铸, 等. 内蒙古河套灌区  $ET_0$  不同计算方法的对比研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 103 – 106.  
YAN H F, SHI H B, XUE Z, et al. Comparison of estimating  $ET_0$  with different methods in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4): 103 – 106. (in Chinese)

34 袁小环, 杨学军, 陈超, 等. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 104 – 110.  
YUAN X H, YANG X J, CHEN C, et al. Applicabilit assessment of reference evapotranspiration models in Beijing based on lysimeter measurement [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13): 104 – 110. (in Chinese)

35 米娜, 陈鹏狮, 张玉书, 等. 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, CHEN P S, ZHANG Y S, et al. A comparative study estimation models for field evapotranspiration [J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1599 – 1606. (in Chinese)

36 赵璐, 梁川, 崔宁博, 等. 不同  $ET_0$  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 – 97.  
ZHAO L, LIANG C, CUI N B, et al. Comparison and improvement of different calculation methods for  $ET_0$  in hilly area of central Sichuan Basin [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 92 – 97. (in Chinese)

37 强小嫚, 蔡焕杰, 孙景生, 等. 陕西关中地区  $ET_0$  计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 121 – 127.  
QIANG X M, CAI H J, SUN J S, et al. Adaptability evaluation for reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) formulas in Guanzhong Region of Shaanxi [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 121 – 127. (in Chinese)

38 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蒸腾量计算方法评价[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1497 – 1505.  
XU J Z, PENG S Z, DING J L, 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)

39 SINGH A K, TRIPATHY R, CHOPRA U K. Evaluation of CERES – Wheat and CropSyst models for water-nitrogen interactions in wheat crop [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(7): 776 – 786.

40 KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China [J]. Agricultural Water Management, 2002, 55(3): 203 – 216.

41 XIONG W, CONWAY D, HOLMAN I, et al. Evaluation of CERES – Wheat simulation of wheat production in China [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(6): 1720 – 1728.