

基于水分驱动的 AquaCrop 模型及其研究进展

张万红^{1,2}, 刘文兆^{1,2}, 王 芸³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 介绍了 AquaCrop 模型的原理及基本参数, 从模型的校验与应用两方面阐述了该模型的研究进展。指出目前仍缺乏实测数据验证 AquaCrop 模型对蒸发及蒸腾的模拟效果; AquaCrop 模型在严重水分及盐分胁迫下模拟结果精度较差; 已开展的模拟研究地域范围窄; 由于缺少更复杂的生理子模块, AquaCrop 模型不能很好解释水分胁迫对光合产物向籽粒运输分配过程的影响。为了提高模型的模拟精度并进一步延伸模型的应用范围, 应完善模型水分及盐胁迫模块, 并在较广范围内获取丰富的实测数据对模型开展进一步的校验研究。

关键词: AquaCrop 模型; 校正; 验证; 模型应用; 多位点; 水分及盐胁迫模块

中图分类号: S152.7⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)04-0096-06

AquaCrop model based on water-driven principle and its research progress

ZHANG Wan-hong^{1,2}, LIU Wen-zhao^{1,2}, WANG Yun³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The theory, parameters and characteristics of AquaCrop model were introduced and its research progress was reviewed from the viewpoints of validation and application of the model. It was pointed that: the measured data of evaporation and transpiration were still lacked for the validation of simulating results of AquaCrop model; the performance of AquaCrop model was poor under severe water and salt stress conditions; The locations for model study were not diverse; Because of lacking of the more complicated plant physiological submodel, AquaCrop model was not able to account for water stress impact on biomass partitioning into yield. In order to increase the accuracy degree of AquaCrop model and extend its application range, it is necessary to get abundant data measured for diverse locations and perfect the module of water and salt stress.

Keywords: AquaCrop model; calibration; validation; model application; diverse location; water and salt stress module

作物模型是借助于数学与计算机手段,对作物生长、发育与产量形成过程所进行的综合数值模拟。作为一种有用的田间管理工具,可为农田播种、施肥、灌溉、当地高产作物品种的选择以及农业政策的制定等提供可靠的科学依据。目前大多数模型需要输入较多的参数,且模型结构复杂,模拟精度低,限制了模型的应用。世界粮农组织(FAO)为了提高作物水分利用效率、节约水资源,解决现有的作物模型复杂、输入数据较多等问题,组织来自不同国家和研究中心的气候、作物、土壤、灌溉、水资源等领域的专家研发了以水分为驱动力的 AquaCrop 模型^[1-4]。它的前身是 FAO 的“产量与水分关系”模型^[5]。AquaCrop 模型与其它模型相比具有输入参数较少,适用的作物种类多等优点,集简单性、准确性及可靠性于一体^[6]。

收稿日期:2013-07-05
基金项目:国家自然科学基金项目“旱地农田水分利用效率链的分项测算及其协同调控”(41171033); 国家“863”计划课题(2013AA102904)
作者简介:张万红(1974—),男,陕西扶风人,博士研究生,主要从事农作物模型模拟研究。E-mail: zhwong1022@163.com。
通信作者:刘文兆(1960—),男,陕西乾县人,研究员,主要从事流域水文生态与管理。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn。

1 AquaCrop 模型的基本原理、特点及重要参数

1.1 基本原理

AquaCrop 模型是在 FAO“产量与水分关系”模型修订的基础上产生的一种新模型,它着重模拟作物生物量与产量对水分供应的响应状况,揭示作物水分响应机制,它通过生物量与收获指数之间的函数关系表达农作物生产力,在模型中生物量的获取由模型模拟作物冠层发展及作物根的生长来实现,冠层的发展对外部环境的变化(土壤水分、施肥量等的变化)做出相应的响应,这种响应机制进而又对作物产量产生影响。它的理论基础基于以下产量水分响应关系式^[5]:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \tag{1}$$

其中, Y_x 、 Y_a 分别为作物最大产量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)、实际产量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), ET_x 、 ET_a 代表作物生长过程中最大蒸散量(mm) 与实际蒸散量(mm), K_y 为相对产量与相对蒸散量之间的关系系数,也称为作物产量反应系数。公式(1) 通过演变后产生 AquaCrop 模型运行的核心公式(2) 和(3)^[7],

$$B = WP \times \sum Tr \tag{2}$$

$$Y = B \times HI \tag{3}$$

式中, B 为地上部生物量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), WP 为水分生产率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$), Tr 为实际蒸腾量(mm), Y 为作物产量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), HI 为作物收获指数(%)。其中 WP 是模型中非常重要的参数,其值随年平均 CO_2 浓度及作物品种的不同而发生变化^[8]。其通常被表示为 WP^* ,在数值上 WP^* 被量化为地上部生物量与“ Tr/ET_0 ”的比值^[9],在特定气候条件下对某一特定作物品种而言其为常数, WP^* 计算可采用公式(4)^[2]:

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_0} \right)} \right]_{[\text{CO}_2]} \tag{4}$$

其中, ET_0 为参考蒸散量(mm),其值可根据 Penman - Monteith 公式^[10]、FAO 的参考蒸散计算模块^[11] 计算获得, $[\text{CO}_2]$ 表示 WP^* 是在某个特定年份的年平均 CO_2 浓度下测定的结果。公式(3) 中的 HI 也具有非常重要的作用,在 AquaCrop 模型中,水分胁迫通过影响冠层衰老,进而对 HI 产生影响,并最终对作物产量产生影响。

AquaCrop 模型由三大模块构成:作物生长模块、

水分模块、作物生长对水分响应模块。模型的基本运行过程是:作物吸收土壤中存储的水分供自身生长,在作物持续吸收土壤水分及周围环境因子的共同作用下,土壤水平衡遭到破坏,土壤水分发生变化。作物冠层的扩展、衰老、叶片气孔运动以及收获指数对土壤水分的变化做出响应,作物的生长发生相应变化。模型最终将这种作物水分动态响应机制表现为作物的变化。

AquaCrop 模型运行的特点是^[7]:将蒸散(ET)分为蒸发(E)与蒸腾(Tr)两部分,这样就避免了将非生产用水与生产用水对作物生长的效应混淆起来,这对于地面不被植被冠层完全覆盖的作物而言尤为重要;以作物冠层的生长与衰老为基础对蒸腾量进行估算,避免了叶面积指数等不确定过程可能对模型模拟造成的误差;作物产量值可以通过地上部生物量与收获指数的乘积获得,因为环境对生物量与收获指数的作用机制不同,AquaCrop 模型将环境胁迫对生物量及收获指数的作用进行了区分;作物对水分胁迫的响应,模型分别通过模拟作物冠层的形成、冠层的衰老、气孔运动及收获指数的变化来表达,将水分胁迫对作物生长总体意义上的影响进行了细化,更有利于理解作物水分响应机制,突出了水分对作物生长的影响;模型输入参数少,界面简单,易操作,适用人员广。

1.2 AquaCrop 模型的参数

AquaCrop 模型大气 - 土壤 - 生物连续体根据输入的参数不同,可以分为四类:作物参数、气象参数、土壤参数和田间管理参数。

作物参数中的最大根深、开花期长短、植株密度等数据可根据当地作物种植信息直接输入。冠层覆盖度参数是 AquaCrop 模型中重要的参数,它决定着植物蒸腾量,并进而影响作物地上部生物量,因此其取值的准确与否对模型的模拟精度至关重要。其值较难直接获取,通常是将叶面积指数(LAI)转换为冠层覆盖度值后再输入,常用的转换公式见公式(5)^[12-13]。或者是在无水分胁迫的条件下,缺失叶面积指数数据时,可以通过公式(6)、(7)、(8)^[2]计算作物不同生育阶段的冠层覆盖度。

$$CC = 1 - \text{EXP}(-K \times LAI) \tag{5}$$

当 $CC \leq CCx/2$ 时

$$CC = CCo \times e^{CGC \times t} \tag{6}$$

当 $CC \geq CCx/2$ 时

$$CC = CCx - (CCx - CCo) \times e^{-CGC \times t} \tag{7}$$

当作物开始衰老时

$$CC = CCx [1 - 0.05(\exp^{\frac{CDC}{CCx}} - 1)] \tag{8}$$

其中 CC 为冠层覆盖度(%), CC_0 为最初冠层覆盖度(%), CGC 为冠层生长指数, CDC 为冠层衰老指数, t 为从达到最初冠层覆盖度值始到某一测量时间止的持续天数, CC_x 为冠层最大覆盖度(%), LAI 为叶面积指数, K 为叶面积指数与冠层覆盖度之间的换算系数, 其随作物品种的不同而不同。

气象参数中, AquaCrop 模型自带的 ET_0 计算软件模块可根据输入的日最高、最低温及日降水量、平均风速、相对湿度自动计算 ET_0 值, 对于中间缺失的气象数据可采用内插法^[14], 但内插法可提供的降雨数据为 10 天或一个月的平均值, 各降雨数值间差异极大, 因此建议尽量不使用内插法提供的降雨数据^[3]。大气中年平均 CO_2 浓度数据的获取从夏威夷莫纳罗亚天文台获取。

土壤参数中的土壤类型、土壤质地根据三角坐标分类法^[14]分类, 对有实测数据的饱和含水量、田间持水量、萎蔫系数、饱和导水率值, 可直接输入模型, 无法取得以上土壤参数的, 可根据土壤传递函数法^[15]进行估算。

田间管理参数主要包括灌溉量、灌溉日期、施肥量与施肥日期等参数, 其可直接从以往的大田监测数据中获取。

2 AquaCrop 模型的研究进展

2.1 模型参数本地化研究

为了提高 AquaCrop 模型的精度, 一些国内外学者对该模型在多种作物上进行了参数本地化(即校正和验证)研究, 以期能较精确地模拟作物生长发育。模拟环境类型有两类: 一类为控制性试验, 即控制各种环境因子; 另一类为非控制性试验, 即在大田展开。

大田环境条件下, 模型的校正和验证主要是调整模型的敏感性参数, 以准确判断作物的冠层覆盖度、地上部生物量及产量对土壤水分的响应。在对模型校正和验证的过程中, 许多学者提出了建设性的意见。如 2009 年 Hsiao^[1]采用 6 年的玉米数据在美国加州戴维斯对 AquaCrop 模型进行了校正及验证工作, 确定了利用 AquaCrop 模型对玉米进行模拟的保守参数(Conservative parameters), 使得其能应用于其它地区。Farahani^[9]等在叙利亚北部地中海气候条件下, 设置了四种不同的灌溉水平, 利用 AquaCrop 模型对棉花进行模拟后, 提出冠层参数的校正是 AquaCrop 模型校正工作中占第一位的。Geerts 等^[16-18]利用 AquaCrop 模型模拟藜麦过程中, 发现模型校正的重点应该放在对引发冠层生长、冠

层衰老的临界水分胁迫系数及形状因子值进行准确确定。Todorovic 等^[19]则在 AquaCrop 与 CropSyst、WOFOST 模型的比较研究中指出, 模型校正最好使用多于两年的在不同气候及土壤条件下获取的实测数据, 在校正工作中同时也应该重视不同品种间的参数差异性。Evet 等^[20]在总结前人模拟研究的基础上指出, 尚无分离的 E (蒸发)及 T_r (蒸腾)数据去验证 AquaCrop 模型模拟作物棵间蒸发及蒸腾数值的准确性, 不能很好地解释 AquaCrop 模型在水分胁迫下模拟结果较差的原因, 也不能准确辨别减少蒸发对提高水分利用效率产生的影响。Tsegay^[21]在干旱与半干旱的埃塞俄比亚利用 AquaCrop 对画眉草模拟后, 认为模型校正与验证过程中, 水分胁迫系数选取准确与否对模型的准确校正至关重要。李会^[22]等对 AquaCrop 模型在中国华北平原的适用性进行研究后, 认为作物达到最大冠层覆盖的日期、冠层开始衰老的日期、田间含水量、饱和含水量、土壤初始含水量以及萎蔫系数的收集与测定准确与否直接影响模型模拟的精度。杜文勇^[23]等在利用 AquaCrop 模型对冬小麦的产量进行预测研究后, 认为拔节前的小麦冠层覆盖度是影响模型模拟精度的关键因子之一。

土壤湿度与大气温度是影响 AquaCrop 模型校正及验证准确与否的重要因子之一。与大田试验相比较, 控制性试验是在温室条件下进行, 在温室条件下可以人为控制土壤湿度及大气温度, 从而提升模型校正及验证的可靠性。Karunaratne^[24]在控制环境因子的条件下, 在英国诺丁汉及非洲的斯威士兰、博茨瓦拉, 利用 AquaCrop 模型对芭芭拉落花生进行了校正与验证, 研究结果表明各地间太阳辐射的不同以及不同品种间的生长差异性导致了模拟值与实测值之间的差异。

模拟研究表明: 在无水分胁迫或者轻微水分胁迫下, 模拟值与实测值非常接近^[25-26], 在严重水分胁迫下, 尤其在冠层衰老阶段, 模拟值与实测值之间差异较大^[19,25]; 在盐胁迫存在的条件下, AquaCrop 模型不能很好地模拟农田蒸散^[26]; 充分灌溉与亏缺灌溉条件下模型模拟结果前者比后者更可靠^[27]; 模型具体输入参数的取值应根据不同的作物品种及当地独特的环境条件而设定^[21], 但没有一种模型可以在不同的田间管理措施及气候等环境条件下对不同品种的作物都做到精确模拟, 因此多环境条件下的模拟结果差异也属正常, 进一步要做的工作是对输入 AquaCrop 模型的参数进行更广泛的校正研究, 尤其是在水分胁迫存在的条件下^[28]。

2.2 模型的应用研究

适用于当地作物的模型经校正及验证后,可以很好地服务于农业生产实践^[29]。许多学者利用校正及验证后的 AquaCrop 模型,在不同的环境条件下进行了多方面的模拟应用研究。

2.2.1 作物对未来气候变化的响应研究 利用 AquaCrop 模型模拟未来气候变化对作物生长影响的研究,主要以 CO₂ 的肥料效应以及大气降水的不确定性对作物生长的影响为主要研究内容。模拟方法以获取未来气象数据为基础,利用 AquaCrop 模型对作物生长进行模拟研究,并合理评价未来气候变化对作物生长的影响。Mainuddin^[30]等为了评估未来气候变化对水稻生产的影响,在湄公河流域利用区域气候模式 PRECIS 构建的气候变化情景文件与 AquaCrop 模型耦合,模拟了 2050 年气候变化对湄公河流域水稻生产的影响,模拟结果表明,雨养条件下湄公河上游地区(老挝与泰国)的水稻产量会显著增加,湄公河下游地区的(柬埔寨与越南)产量会减少,假如稻田增加灌溉的条件可以被满足,则未来气候变化不会对该地区水稻的产量产生影响。Vanuytrecht 等^[31]则对未来 CO₂ 浓度的变化对马铃薯与玉米产量的影响进行了预测,预测结果表明,受 CO₂ 浓度的影响,在未来的几十年里,CO₂ 浓度对马铃薯及玉米产量的影响可以高达 27%。

2.2.2 水分利用效率提高与农田水管理 AquaCrop 模型是以水分为驱动力的模型,在模拟作物生长的过程中,模型能很好地反应水分与作物生长之间的关系。以往的研究也已证实 AquaCrop 模型在无水分胁迫或者轻微水分胁迫下能较好地模拟水分变化^[28]。在准确校正及验证模型的基础上,利用 AquaCrop 模型对农田水进行管理主要以优化农田灌溉、提高作物产量为主,其具体研究内容主要包括:农田最佳灌溉时间及灌溉量的确定;以灌溉用水的价格、消耗的水量为基础,综合考虑作物产量、价格等因素,以获取最大化经济效益为目标的农业生产计划的制定;提高作物水分利用效率,在模型模拟结果的指导下,适度改变当地作物种植习惯,以减轻作物受水分胁迫的影响。模拟工作主要在农业灌溉用水相对缺乏的地区展开,例如南美洲^[16-18]、非洲^[27,32]、中东^[9,24,33-34]、亚洲东部的一些地区^[35-37]。已模拟的作物主要有大麦^[27,32]、棉花^[9,38-39]、藜麦^[16]、小麦^[23,33-34,40-42]、玉米^[22,25-26,31,35-36,43-45]、向日葵^[44,46]、甜菜^[44]、卷心菜^[47]及大葱^[48]等。

以优化农田灌溉,提高土壤水分利用效率为出发点,Geerts 等^[16]使用 AquaCrop 模型并结合频率分

析方法进行了模拟,确定了藜麦的灌溉方案,该方案在最大程度上保证了藜麦免受干旱的胁迫,同时也提高了藜麦的水分利用效率。Hamidreza^[33]则利用 AquaCrop 模型在亏缺灌溉的条件下,以提高作物水分利用效率为出发点对小麦生产进行了模拟研究,结果表明,在充分灌溉及轻微水分胁迫条件下, AquaCrop 模型可以较好地模拟作物的地上部生物量,但在该地区,由于盐胁迫的存在, AquaCrop 模型不能很好地模拟土壤蒸散发。Stricevic 等^[44]通过对当地三种主要作物的模拟结果进行比较,研究结果表明 AquaCrop 模型可以很好地模拟三种农作物水分生产率以及产量,在干旱发生条件下,玉米应比向日葵和甜菜优先考虑灌溉,同时也提出,甜菜与向日葵在当地可以不考虑灌溉。Araya 等^[49]在采用 AquaCrop 模型对充分灌溉与亏缺灌溉条件下的大麦产量、生物量以及水分利用效率进行了模拟,结果表明充分灌溉条件下的模拟结果比亏缺灌溉下的模拟结果更可靠。项燕^[36]与庄严^[35]利用 AquaCrop 模型对玉米的生长进行模拟,提出 AquaCrop 模型在当地能较好地模拟土壤水平衡,应用该模型可以为当地进行科学灌溉提供理论指导。

在模型模拟的基础上对模拟结果进行分析,并最终确定本地区最佳的播种时间及播种深度,归根结底也是以提高作物水分利用效率为目的。Araya^[27]与 Abrha^[32]等在干旱及半干旱的埃塞俄比亚北部地区,对不同播种期及不同水分供应条件下的大麦进行模拟研究后发现,播种日期及播种深度差异将导致该地区大麦的产量发生变化,通过适当调整播种日期与深度,可以使大麦在生长期避开干旱天气并提高其水分利用效率。

2.2.3 与经济模型结合使用以获取最大经济效益

在考虑水分利用效率提高的同时,一些经营者往往希望以较少的农田灌溉量收获较大的作物产量,以获取最大化作物经济效益。对种植区只有单一品种的作物而言,通过优化灌溉,可以实现以较少的灌溉用水获取较大的作物产量并获取较高的经济价值。但同一地区往往种植着多种作物,一些属于低耗水量作物,另一些则属于高耗水作物,单方面考虑减少灌溉用水量,难以实现该地区较大的经济收益。AquaCrop 模型中没有与农业生产过程中各环节经济效益相应的模块,与相关的经济模型耦合是应用的一个重要方面。Garcia^[50]等利用 AquaCrop 模型与经济学模型结合的方式,在综合考虑水价、农产品价格及农业政策的基础上,对棉花、玉米、西红柿及向日葵进行了模拟研究,认为在水分缺乏的条件下,对于

同一地区的多种作物,应考虑将低耗水的作物与高耗水且经济价值较高的作物配套种植。同时他也认为在水分限制的条件下,最好的种植模式是,低耗水量农作物与经济价值较高且需水量相对较大的农作物配套种植^[38]。他的研究也表明,当地水资源管理局对水量分配的决策迟缓性对农户的收入会造成负面影响,就进行模拟研究的区域而言,这种迟缓性造成的损失可达 300 欧元每公顷。

2.2.4 AquaCrop 模型与其它模型间的比较研究

为了明确 AquaCrop 模型与其它作物模型之间存在的不同优缺点,Todorovic 等^[34]及张铁楠等^[51]分别做了不同的比较研究。Todorovic 等在意大利南部典型的地中海地区在充分灌溉、雨养及亏缺灌溉条件下,使用 WOFOST、CropSyst 及 AquaCrop 三种模型对向日葵 (*Helianthus annuus* L.) 地上生物量及产量的模拟进行了评价。三种模型在严重水分胁迫下产量模拟值均低于实测值,由于 AquaCrop 和 CropSyst 模型结构相对 WOFOST 模型较简单且前两者模型都缺少更复杂的作物生理子模块,因此 AquaCrop 和 CropSyst 模型相对 WOFOST 模型不能很好地解释水分胁迫对地上部生物量积累及光合产物运输分配到籽粒的影响,但 AquaCrop 和 CropSyst 模型在轻微及适度的水分胁迫下模拟结果令人满意,而且由于 AquaCrop 和 CropSyst 模型相对 WOFOST 模型需要输入的参数少,因此前两者比后者更容易校正,更适宜于在农田范围大、输入参数较少的条件下使用,尤其 AquaCrop 模型。张铁楠等^[51]在中国东北比较了 AquaCrop 模型与 WOFOST 模型对春小麦生物量、土壤含水量等的模拟研究,模拟结果表明,WOFOST 模型模拟结果比 AquaCrop 模型更加全面,而且在极端气候条件下,WOFOST 模型模拟作物生长结果较 AquaCrop 模型更可靠,但两者对土壤含水量的模拟结果基本相似,WOFOST 模型数据库的建立较 AquaCrop 模型复杂,而且所需数据较多,AquaCrop 模型界面简洁,需要输入的参数少,可操作性强,具有普适性。

3 问题及展望

每种模型都有其局限性,AquaCrop 模型也是如此。自世界粮农组织 (FAO) 发布 AquaCrop 模型以来的不长时间里,该模型在多样的环境条件下得到了验证及应用研究,然而模型在运行过程中,仍存在一些问题,需要在今后的研究中加以改进和完善。

1) 在对 AquaCrop 模型进行校验的过程中蒸发及蒸腾数据的模拟缺乏比较可靠的实测数据的验

证,这些数据的地区差异性也应该被体现出来

2) 就地域范围与所模拟的作物品种而言,目前利用 AquaCrop 模型进行模拟研究的工作主要集中在非洲、中东等区域,模拟研究的作物品种仍然有限。同时考虑到世界上仍有许多地区无灌溉条件的现实,也应加强 AquaCrop 模型对旱作地区提高水分利用效率及作物产量的模拟研究。对于只在一个地区已进行过模拟研究的作物,应增加其在不同地区的对比研究,以较准确地给出保守参数 (Conservative parameters) 的估计。

3) 当 AquaCrop 模型与天气发生器耦合,对未来天气条件下的作物生长进行模拟研究时,尽量选用较短时间段内的气象数据,而不是一个较长时间段内的平均气象数据,这样可提高模型的模拟精度。

4) 在严重水分及盐分胁迫存在的条件下,模型模拟精度尚不能令人十分满意。这是今后需要加强研究的一个重要方面,应进一步完善作物对水分及盐分响应模块。在 AquaCrop 模型应用研究方面,除了考虑水分因素外,也应考虑养分因素的变化及其对作物产量的影响,以求对大田施肥进行科学管理。

5) AquaCrop 模型缺乏更复杂的生理子模块,所以不能很好地解释水分胁迫对地上部生物量积累及光合产物向籽粒转移的影响。

参考文献:

- [1] Hsiao T C, Heng L, Steduto P, et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):448-459.
- [2] Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):426-437.
- [3] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):438-447.
- [4] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, et al. AquaCrop Calculation Procedure, Prototype Version 2.3a[M]. Rome, Italy: FAO, 2008.
- [5] Doorembos J, Kassam A H. Yield response to water FAO Irrig and Drain. Paper No. 33[M]. Rome, Italy: FAO, 1979.
- [6] FAO. Reference manual, introducing AquaCrop[M]. Rome: FAO, 2009.
- [7] Steduto P, Raes D, Hsiao T C, et al. AquaCrop: A new model for crop prediction under water deficit conditions[J]. Options Méditerranéennes, Series A, 2009, 80:285-292.
- [8] Steduto P, Hsiao T C, Fereres E. On the conservative behavior of biomass water productivity[J]. Irrigation Science, 2007, 25(3): 189-207.
- [9] Farahani H J, Izzi G, Oweis T Y. Parameterization and evaluation of the aquaCrop model for full and deficit irrigated cotton[J]. Agronomy

- Journal, 2009, 101(3):469-476.
- [10] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage No. 56[M]. Rome:FAO, 1998.
 - [11] FAO. Reference Manual – The ETo Calculator Version 3.1[M]. Rome:FAO, 2009.
 - [12] Belmans C, Wesseling J G, Feddes R A. Simulation model of the water balance of a cropped soil: Swatre[J]. Journal of Hydrology, 1983, 63(3/4):271-286.
 - [13] Ritchie J T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover[J]. Water Resources Research, 1972, 8(5):1204-1213.
 - [14] Engineering Division Soil Conservation Service. Irrigation chart 1: Soil – Plant – Water Relationships[M]. Washington. D C: United States Department of Agriculture, 1991.
 - [15] Saxton K E, Romberger W J, Papendick J S. Estimating generalized soil-water characteristics from texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(4):1031-1036.
 - [16] Geerts S, Raes D, Garcia M. Using aquacrop to derive deficit irrigation schedules[J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(1):213-216.
 - [17] Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Modeling the potential for closing quinoa yield gaps undervarying water availability in the Bolivian Altiplano[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(11):1652-1658.
 - [18] Geerts S, Raes D, Garcia M, et al. Simulating yield response of quinoa to water availability with aquacrop[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):499-508.
 - [19] Todorovic M, Albrizio R, Zivotic L, et al. Assessment of aquacrop, cropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):509-521.
 - [20] Evett S R, Tolk J A. Introduction: can water use efficiency be modeled well enough to impact crop management[J]. agronomy Journal, 2009, 101(3):423-425.
 - [21] Tsegay A, Raes D, Geerts S, et al. Unravelling crop water productivity of tef (*Eragrostis Tef* (Zucc.) Trotter) through aquacrop in northern ethiopia[J]. Experimental Agriculture, 2012, 48(2):222-237.
 - [22] 李会, 刘钰, 蔡甲冰, 等. AquaCrop 模型的适用性及应用初探[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3):28-32.
 - [23] 杜文勇, 何雄奎, Z. Shamaila, 等. 冬小麦生物量和产量的 AquaCrop 模型预测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4):174-178.
 - [24] Karunaratne A, Azam – Ali S, Izzi G, et al. Calibration and validation of fao-aquacrop model for irrigated and water deficient bambara groundnut[J]. Experimental Agriculture, 2011, 47(3):509-527.
 - [25] Heng L K, Hsiao T, Evett S, et al. Validating the FAO aquaCrop model for irrigated and water deficient field maize[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):488-498.
 - [26] Salemi H, Soom M A M, Mousavi S F, et al. Irrigated silage maize yield and water productivity response to deficit irrigation in an arid region[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2011, 20(5):1295-1303.
 - [27] Araya A, Habtu S, Hadgu K M, et al. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*) [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(11):1838-1846.
 - [28] Zeleke K T, Luckett D, Cowley R. Calibration and testing of the FAO AquaCrop model for canola[J]. Agronomy Journal, 2011, 103(6):1610-1618.
 - [29] Soltani A, Hoogenboom G. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data[J]. Field Crops Research, 2007, 103:198-207.
 - [30] Mainuddin M, Kirby M, Hoanh C T. Adaptation to climate change for food security in the lower Mekong Basin[J]. Food Security, 2011, 3(4):433-450.
 - [31] Vanuytrecht E, Raes D, Willems P. Considering sink strength to model crop production under elevated atmospheric CO₂ [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12):1753-1762.
 - [32] Abhra B, Delbecque N, Raes D, et al. Sowing strategies for barley (*Hordeum Vulgare* L.) based on modelled yield response to water with AquaCrop [J]. Experimental Agriculture, 2012, 48(2):252-271.
 - [33] Salemi H, Soom M A M, Lee T S, et al. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region [J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 610:2204-2215.
 - [34] Alizadeh H, Nazari B, Parsinezhad M, et al. Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in karaj area[J]. Iranian Journal of Irrigation And Drainage, 2010, 4(2):273-283.
 - [35] 庄严. 不同基因型作物水分—产量响应关系及生理生态学基础研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
 - [36] 项艳. AquaCrop 模型在华北地区夏玉米生产中的应用研究[D]. 山东: 山东农业大学, 2009.
 - [37] Zhang Wanhong, Liu Wenzhao, Xue Qingwu, et al. Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China[J]. Water Science & Technology, 2013, 68(4):821-828.
 - [38] García – Vila M, Fereres E, Mateos L, et al. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(3):477-487.
 - [39] Akhtar F, Tischbein B, Awan U K. Optimizing deficit irrigation scheduling under shallow groundwater conditions in lower reaches of amu darya river basin[J]. Water Resour Manage, 2013, 27(8):3165-3178.
 - [40] Erkossa T, Menker M, Betrie G D. Effects of bed width and planting date on water productivity of wheat grown on vertisols in the ethiopian highlands[J]. Irrigation and Drainage, 2011, 60(5):635-643.
 - [41] Andarzian B, Bannayan M, Orsham A, et al. AquaCrop simulation yield response of wheat to water availability in south of Iran [C]// Reza Ardakanian, Teresa Walter. Improving farm management strategies through AquaCrop: worldwide collection of case studies. Yogyakarta, Indonesia: FAO and UNW – DPC, 2010:47.

[7] Whitmore A P, J J Schröder. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield A modelling study[J]. Europ. J. Agronomy, 2007,27:81-88.

[8] 朱自玺,赵国强,邓天宏,等.秸秆覆盖麦田水分动态及水分利用效率研究[J].生态农业研究,2000,(1):36-39.

[9] Sarkar S, Singh S R. Interactive effect of tillage depth and mulch on soil temperature, productivity and water use pattern of rainfed barley (*Hordium vulgare* L.)[J]. Soil & Tillage Research, 2007,92:79-86.

[10] Sarkar S, Paramanick M, Goswami S B. Soil temperature, water use and yield of yellow sarson(*Brassica napus* L. var. glauca) in relation to tillage intensity and mulch management under rainfed lowland ecosystem in eastern India[J]. Soil & Tillage Research, 2007,93:94-101.

[11] 樊向阳,齐学斌,郎旭东,等.不同覆盖条件下春玉米田耗水特征及提高水分利用率研究[J].干旱地区农业研究,2002,(2):63-67.

[12] Willey R W. Intercropping-its importance and research needs: I. Competition and yield advantages[J]. Field Crops Abstr, 1979,32:1-10.

[13] 刘青林,张恩和,王琦,等.灌溉与施氮对留茬免耕春小麦耗水规律、产量和水分利用效率的影响[J].草业学报,2012,21(5):69-77.

[14] 员学锋,吴普特,汪有科,等.免耕条件下秸秆覆盖保墒灌溉的土壤水、热及作物效应研究[J].农业工程学报,2006,(7):30-34.

[15] 刘玉洁,李援农,潘韬,等.不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2009,(6):73-78.

[16] 郭清毅,黄高宝.保护性耕作对旱地麦-豆双序列轮作农田土壤水分及利用效率的影响[J].水土保持学报,2005,19(3):165-167.

[17] 姚宝林.河西内陆河灌区覆盖免耕储水灌溉节水技术初步研究[D].兰州:甘肃农业大学,2005,(2):1-2.

[18] 方文松,朱自玺,刘荣花,等.秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J].干旱地区农业研究,2009,(6):129-134.

[19] Barros, Lcg, Hanks, Rj. Evapotranspiration and yield of beans as affected by mulch and irrigation[J]. Agronomy Journal,1993,85(3):692-697.

[20] 丁林,金彦兆,李元红,等.石羊河流域农田休闲期耗水规律试验研究[J].中国生态农业学报,2011,(4):65-71.

(上接第 101 页)

[42] Shrestha N, Raes D, Vanuytrecht E, et al. Cereal yield stabilization in Terai (Nepal) by water and soil fertility management modeling[J]. Agricultural Water Management, 2013,122:53-62.

[43] Zinyengere N, Mhizha T, Mashonjowa E, et al. Using seasonal climate forecasts to improve maize production decision support in Zimbabwe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(12):1792-1799.

[44] Stricevic R, Cosic M, Djurovic N, et al. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(10):1615-1621.

[45] Flores-Gallardo H, Ojeda-Bustamante W, Flores-Magdaleno H, et al. Simulation of corn (*Zea Mays* L.) yield in northern sinaloa using the aquacrop model[J]. Agrobiencia,2013,47(4):347-359.

[46] Yuan M, Zhang L, Gou F, et al. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia[J]. Agricultural Water Management, 2013,122:28-38.

[47] Wellens J, Raes D, Traore F, et al. Performance assessment of the FAO AquaCrop model for irrigated cabbage on farmer plots in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2013,127:40-47.

[48] 李子忠,徐洋,卢宪菊,等.AquaCrop 模型在大葱生物量和土壤贮水量模拟中的应用和验证[J].中国农业大学学报,2011,16(4):59-66.

[49] Araya A, Keesstra S D, Stroosnijder L. Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model[J]. Field Crops Research, 2010,116(1/2):196-204.

[50] Garcia-Vila M, Fereres E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level[J]. European Journal of Agronomy, 2012,36(1):21-31.

[51] 张铁楠,付驰,李晶,等.基于寒地春小麦 AquaCrop 与 WOFOST 模型适应性验证分析[J].作物杂志,2013,154(3):121-126.